

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 63 Номер 10 2020



• МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Роль Д.К. Чернова в создании и развитии учения о современной металлургии и металловедении

Моделирование напряжений при правке горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации

Изменение податливости сырой песчано-глинистой формы под воздействием геометрических и теплофизических свойств отливки

• ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Использование углеродсодержащих отходов производства алюминия в черной металлургии

• ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Химические реакции при восстановлении железа из оксидов



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

№ 10, 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)

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. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
ЮСУПОВ В.С. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

Учредители:



Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»



Сибирский государственный индустриальный университет

Настоящий номер журнала подготовлен к печати
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,
Кемеровская обл. – Кузбасс, ул. Кирова, зд. 42
Сибирский государственный индустриальный университет,
Тел.: (3843) 74-86-28
E-mail: redjizvz@sibsiu.ru

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

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

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

IZVESTIYA

VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA

IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY

Editor-in-Chief: 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,
Sidney, Australia)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

M. SPEIDEL (Swiss Academy of Materials, Switzerland)

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

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

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

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

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

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

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

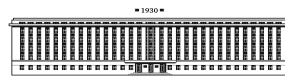
M. ZINIGRAD (Ariel University, Israel)

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

Founders:



National Research Technological University "MISIS"



Siberian State Industrial University

This issue of the journal was prepared by
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

Главный редактор журнала академик РАН Леонтьев Леопольд Игоревич стал лауреатом Демидовской премии 2020 года ..	769
100 лет кафедре «Инжиниринг технологического оборудования» НИТУ «МИСИС»	772

По итогам Международной научной конференции
«ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ»
им. академика А.М. САМАРИНА, Москва, 25 – 28 ноября 2019 г.

Зиятдинов М.Х. Из истории азотированных ферросплавов	773
Морозов А.О., Погодин А.М., Комолова О.А., Бикин К.Б., Григорович К.В. Контроль оксидных неметаллических включений в процессе производства IF стали	782
Жучков В.И., Заякин О.В. Разработка состава и процесса получения многокомпонентных ферросплавов	791

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Леонтьев Л.И., Цуканов В.В., Смирнова Д.Л. Роль Д.К. Чернова в создании и развитии учения о современной металлургии и металловедении. Часть 1. Основные теоретические и промышленные открытия Д.К. Чернова	796
Зайдес С.А., Фам Ван Ань. Повышение качества калиброванной стали поверхностным деформированием. Часть 1. Определение напряженного состояния цилиндрических деталей при орбитальном поверхностном деформировании	802
Котов К.А., Болобанова Н.Л., Нуштаев Д.В. Моделирование напряжений при правке горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации	808
Пантейков С.П. Этапы совершенствования сварных конструкций пятисопловых фурменных головок в конвертерном цехе ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат»	815
Побегалова Е.О., Иванова В.А. Влияние транспортирования на качество литейного кокса	823
Колокольцев В.М., Савинов А.С., Феоктистов Н.А., Постников А.С. Изменение податливости сырой песчано-глинистой формы под воздействием геометрических и теплофизических свойств отливки	829

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Кузьмин М.П., Кузьмина М.Ю., Джиа Ку. Ран, Кузьмина А.С., Бурдонов А.Е. Использование углеродсодержащих отходов производства алюминия в черной металлургии	836
--	-----

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Бердников В.И., Гудим Ю.А. Химические реакции при восстановлении железа из оксидов	842
--	-----

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Орлов Д.А., Гончарук А.В., Кобелев О.А., Комарницкая О.Г., Бунин Н.С. Анализ особенностей процесса прошивки труб на ТПА 70-270 с применением метода конечных элементов	848
--	-----

В ПОРЯДКЕ ДИСКУССИИ

Федосов А.В., Чумаченко Г.В. Анализ и классификация замеров температуры, выполненных в процессе плавки и разливки сплавов с применением нейронных сетей	856
---	-----

CONTENTS

Editor-in-Chief, Academician of RAS Leopold Igorevich Leontiev became the winner of the Demidov Prize in 2020	769
To the 100 th Anniversary of the Chair "Engineering of Technological Equipment" of NUST "MISIS"	772

Futher to the International Scientific Conference
“PHYSICO-CHEMICAL BASES OF METALLURGICAL
PROCESSES” named after Academician A.M. SAMARIN,
Moscow, November 25 – 28, 2019

M.Kh. Ziatdinov From the history of nitrided ferroalloys	773
A.O. Morozov, A.M. Pogodin, O.A. Komolova, K.B. Bikin, K.V. Grigorovich Control of oxide non-metallic inclusions in production of IF steel	782
V.I. Zhuchkov, O.V. Zayakin Development of composition and process of obtaining multicomponent ferroalloys	791

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

L.I. Leont'ev, V.V. Tsukanov, D.L. Smirnova D.K. Chernov's role in creating and developing the doctrine of modern metallurgy and metal science. Part 1. D.K. Chernov's main theoretical and industrial discoveries	796
S.A. Zaides, Pham Van Anh Quality improvement of calibrated steel by surface deformation. Part 1. Determination of the stressed state of cylindrical parts during orbital surface deformation	802
K.A. Kotov, N.L. Bolobanova, D.V. Nushtaev Modeling the stress state of steel strip at roller levelling machine under cyclic alternating deformations	808
S.P. Panteikov Development of welded structure of 5-nozzle lance heads in converter shop of PJSC "Dneprovsky metallurgical combine"	815
E.O. Pobegalova, V.A. Ivanova Impact of transportation on foundry coke quality	823
V.M. Kolokol'tsev, A.S. Savinov, N.A. Feoktistov, A.S. Postnikova Change in ductility of a raw sand-clay mold under influence of geometric and thermophysical properties of the casting	829

ECOLOGY AND RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES

M.P. Kuz'min, M.Yu. Kuz'mina, Jia Q. Ran, A.S. Kuz'mina, A.E. Burdonov The use of carbon-containing wastes of aluminum production in ferrous metallurgy	836
---	-----

PHYSICO-CHEMICAL BASICS OF METALLURGICAL PROCESSES

V.I. Berdnikov, Yu.A. Gudim Chemical reactions during iron reduction from oxides	842
--	-----

INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

D.A. Orlov, A.V. Goncharuk, O.A. Kobelev, O.G. Komarnitskaya, N.S. Bunits Analysis of pipe piercing on PRP 70-270 with FEM modeling	848
---	-----

IN THE ORDER OF DISCUSSION

A.V. Fedosov, G.V. Chumachenko Analysis and classification of temperature measurements during melting and casting of alloys using neural networks	856
---	-----

Главный редактор журнала академик РАН Леонтьев Леопольд Игоревич стал лауреатом Демидовской премии 2020 года

30 ноября 2020 г. на площадке пресс-центра ТАСС–Урал были объявлены лауреаты Демидовской премии этого года.

Мероприятие проходило в онлайн-формате. В дистанционном режиме в пресс-конференции приняли участие академики РАН Геннадий Месяц, Валерий Чарушин, Юрий Осипов, Валерий Тишков, Андрей Ремпель и ректор Уральского федерального университета им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина Виктор Кокшаров. Исполнительный директор Научного Демидовского фонда Валерий Чарушин отметил, что лауреатов этого года отличают заслуги не только в сфере науки, но и в сфере образования. «Мне приятно, что на Демидовской премии 2020 года собрали созвездие имен, выдающихся профессионалов. Хотя Демидовские премии отмечают прежде всего достижения в науке, сегодня мы очень много говорим об образовании. И лауреатов премии этого года отличает то, что наряду с занятием наукой все лауреаты внесли огромный вклад в развитие образования», – сказал он.

Председатель попечительского совета научного Демидовского фонда, академик Российской академии наук (РАН) Геннадий Месяц объявил имена лауреатов премии 2020 года на пресс-конференции в Уральс-

ком информационном центре ТАСС: «В номинации “Прикладная математика” Демидовская премия 2020 года присуждается академику Виктору Антоновичу Садовничему, выдающемуся ученому математике и механике, создателю и руководителю известной математической школы.

В номинации “Металлургия” премия присуждается академику Леопольду Игоревичу Леонтьеву, выдающемуся ученому, яркому представителю школы уральских металлургов, главному научному сотруднику Института металлургии Уральского отделения РАН, советнику РАН.

В номинации “Общественные науки” – академику Анатолию Васильевичу Торкунову, выдающемуся российскому востоковеду, историку и политологу, ректору Московского государственного института международных отношений.

Четвертым лауреатом в этом году в номинации “Новые технологии” стал председатель совета директоров Трубной металлургической компании Дмитрий Пумпянский, выдающийся инженер и организатор научно-технических программ с привлечением академических, вузовских учреждений, а также частных промышленных предприятий», – сказал Геннадий Месяц.



*Председатель попечительского совета научного Демидовского фонда,
академик Российской академии наук (РАН) Геннадий Месяц*

О ЛАУРЕАТАХ 2020 ГОДА

В 2020 г. впервые в современной истории Демидовской премии она была вручена двум металлургам – академику РАН Леонтьеву Л.И. и председателю совета директоров Трубной металлургической компании, д.э.н. Пумпянскому Д.А.

Леопольд Игоревич Леонтьев – российский ученый-металлург, академик РАН. Научная деятельность Л.И. Леонтьева посвящена разработке ряда важнейших направлений: развитию физико-химических основ комплексного передела руд сложного состава и техногенных отходов, созданию научно обоснованных, экономически эффективных и экологически безопасных технологий их переработки. Результаты выполненных им теоретических исследований использованы для разработки ряда новых технологий передела комплексных руд и техногенных материалов, которые защищены авторскими свидетельствами, патентами, испытаны или внедрены в производство. Л.И. Леонтьев возглавляет научную школу по данному направлению. Под его руководством изучены условия образования экологически опасных соединений типа оксидов азота, фуранов, диоксинов и даны рекомендации по снижению их выбросов в пирометаллургических процессах; развита теория коагуляции фаз в оксидных матрицах в связи с разработкой пирометаллургического способа обогащения руд сложного состава. Л.И. Леонтьев активно ведет преподавательскую деятельность: в 1987 – 1998 гг. – профессор, заведующий кафедрой металлургичес-

кого факультета УГТУ-УПИ, с 1998 г. – профессор кафедры руднотермических процессов Московского института стали и сплавов, с 2015 г. готовит будущих металлургов на кафедре энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий НИТУ «МИСиС». Им подготовлено 2 доктора наук, 11 кандидатов наук. Имеет более 500 научных публикаций. Ему принадлежит более 120 патентов и изобретений. Л.И. Леонтьев лауреат Государственной премии РФ (2000 г.) и трех Премий Правительства РФ (2002, 2008 и 2019 гг.), удостоен Премии им. И.П. Бардина РАН (2004 г.) и Премии им. В.Е. Грум-Гржимайло УрО РАН (2011г.), награжден орденами Трудового Красного Знамени и Почета, знаком отличия «За заслуги перед Свердловской областью» III степени (2009 г.).

Дмитрий Александрович Пумпянский – российский предприниматель. С 2005 г. по настоящее время занимает должность председателя Совета директоров Трубной металлургической компании, с 2019 г. президент группы «Синара». Доктор экономических наук, кандидат технических наук, председатель наблюдательного совета Уральского федерального университета. В области экономики Д.А. Пумпянский исследовал вопросы развития конкурентоспособности, главным образом, на примере трубной подотрасли, на новом, современном этапе развития экономики России. Разработал теоретические и методологические подходы развития интегрированных структур с позиции оценки их конкурентных возможностей, выявления институциональных резервов повышения эффек-



Леопольд Игоревич Леонтьев



Дмитрий Александрович Пумпянский

тивности корпоративной организации, использования новых принципов и инструментов в процессе формирования и реализации стратегии конкурентного развития интегрированных компаний международного уровня. В области черной металлургии Д.А. Пумпянский развиты научные основы новых технологий в трубной промышленности. Результатом стала комплексная реконструкция производства бесшовных труб от выплавки высококачественной стали, перехода на применение непрерывнолитой заготовки, массового внедрения высокопроизводительных трубопрокатных агрегатов с непрерывным станом на частично удерживаемой оправке, производства высокопрочных труб в хладостойком и сероводородостойком исполнениях. Полностью решены вопросы импортозамещения в нефтяной и газовой промышленности, в том числе при разработке нетрадиционных и трудноизвлекаемых запасов углеводородов. Д.А. Пумпянский лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники 2006 года за решение вопросов производства сварных труб диаметром 1420 мм для строительства магистральных трубопроводов. Автор 32 изобретений, более 150 научных работ, 12 книг и монографий.

О ПРЕМИИ

Демидовская премия для ученых учреждена в 1831 г. уральским промышленником, камергером двора Его Императорского величества Павлом Николаевичем Демидовым, «желая содействовать преуспеянию наук словесности и промышленности в своем отечестве». Ежегодно на премии выделялось 20 000 рублей государственными ассигнациями, а само присуждение наград меценат предоставлял Российской Императорской академии наук как «первенствующему ученому сословию в империи». Присуждалась до 1866 г. ежегодно, 17 апреля, в день

рождения императора Александра II, и считалась самой почетной неправительственной наградой России. За эти годы ученым было выделено 55 полных, составлявших по пять тысяч рублей государственных ассигнациями, и 220 половинных премий.

В 1993 г. в Екатеринбурге по инициативе академика Геннадия Месяца, возглавлявшего на тот момент Уральское отделение Российской академии наук, и в результате объединения усилий уральских ученых и предпринимателей традиция возобновилась. Общественные неправительственные Демидовские премии присуждаются за личный выдающийся вклад в области науки о Земле, физики и математики, экономики и предпринимательства, а также за вклад в гуманитарные науки. Ученые награждаются не за отдельный научный труд, а по совокупности работ. Будущие лауреаты определяются не на конкурсной основе, а путем опроса специалистов той или иной области и по итогам голосования научного сообщества страны. Окончательное решение выносят пять комиссий и комитет по премиям, в который входят крупнейшие ученые России.

В разные годы лауреатами Демидовской премии были Жорес Алферов, Андрей Зализняк, Владимир Фортов, Андрей Гапонов-Грехов, Николай Лавёров, Людвиг Фаддеев, Геннадий Месяц и другие ученые.

Вручение Демидовских премий традиционно пройдет 8 февраля 2021 г. в Екатеринбурге.

По материалам сайтов ТАСС (<https://nauka.tass.ru/nauka/10127971>) и Академик (<https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/36360>).

Коллектив редакции от всей души поздравляет Леопольда Игоревича с наградой и столь высокой оценкой его вклада в развитие российской науки и желает ему новых замыслов, проектов, открытий!

100 ЛЕТ КАФЕДРЕ «ИНЖИНИРИНГ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ» НИТУ «МИСИС»

В 2020 г. состоялось знаменательное событие: кафедре инжиниринга технологического оборудования (ИТО) НИТУ «МИСиС» исполнилось 100 лет.

В 2014 г. в состав кафедры ИТО вошла кафедра теоретической прикладной механики и сопротивления материалов Горного института. Произошло это неслучайно, так как наши кафедры имеют одни и те же корни. Их основателями считаются выдающиеся ученые, профессора Бобарыков И.И. и Левенсон Л.Б., которые основали и развили соответствующие подразделения в стенах Московской Горной Академии (МГА).

После реорганизации МГА в 1930 г. и появления Московского Горного Института (МГИ) и Московского Института Стали (МИС), пути наших подразделений разошлись, хотя Левенсон Л.Б. продолжал возглавлять как кафедру прикладной механики МГИ, так и кафедру деталей машин МИС. Подготовку инженерных кадров, кроме упомянутых выше основателей, вели у горняков профессора Воронков И.М., Руденко Н.Ф., Осецкий В.М., Рачек В.М., Дмитрак Ю.В., Бардовский А.Д. и др. У металлургов – профессора Миловидов С.С., Полухин В.П., Чиченёв Н.А. и др. В настоящее время объединенную кафедру возглавляет профессор Горбатюк С.М.

За время своего существования кафедра подготовила более 500 специалистов высокой квалификации, более 50 кандидатов технических наук, 26 докторов технических наук.

Наиболее известными учебниками, написанными руководителями в основном в соавторстве с коллегами по кафедре, являются: «Детали машин» (И.И. Бобарыков), «Теория механизмов и машин» (Л.Б. Левенсон), «Курс теоретической механики» (И.М. Воронков), «Атлас грузоподъемных машин» (Н.Ф. Руденко), «Прикладная механика» (В.М. Осецкий), «Основы расчета и конструирования железобетона» (А.И. Дыховичный), «Строительная механика» (Ю.И. Бурчаков), «Выбор оборудования для переработки нерудных карьеров»

(А.Д. Бардовский), «Детали машин» (С.С. Миловидов), «Машины и агрегаты металлургических заводов» (В.П. Полухин), «Надежность технологических машин», «Технологическое вакуумное оборудование» (Н.А. Чиченёв), «Детали машин и основы конструирования» (С.М. Горбатюк).

Сотрудниками кафедры успешно выполнен ряд задач горно-металлургической промышленности: усовершенствовались горнодобывающее оборудование; разработана эффективная конструкция крепей, внедренных при сооружении шахтных стволов рудников Таймырский, Октябрьский, Комсомольский и др.

Результаты научных исследований металлургов получили широкое внедрение на Магнитогорском, Череповецком, Новолипецком, Карагандинском, Мариупольском металлургических комбинатах, на заводах Электросталь, Ижорском, Донецком металлургическом, Запорожсталь и др.

Разработаны новые технологии, оборудование и инструмент для обработки тугоплавких металлов, внедренные на предприятиях ПО «Союзтвердосплав». Большое внимание уделялось строительству и конструированию машин по переработке нерудных строительных материалов, обеспечивающих повышение производительности труда, утилизацию отходов, в том числе на предприятиях московского региона.

В последние годы кафедра расширила круг своих научных интересов. Преподаватели, аспиранты, студенты кафедры решают задачи, направленные на совершенствование технологий и оборудования, связанных с охраной окружающей среды, медициной, переработкой промышленно-бытовых отходов и многих других актуальных отраслей народного хозяйства.

В текущем десятилетии кафедра инжиниринга технологического оборудования продолжает славные традиции, сложившиеся на протяжении столетия ее существования.



УДК 669.15-198

ИЗ ИСТОРИИ АЗОТИРОВАННЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ

*Зиятдинов М.Х., д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории
высокоэнергетических материалов (ziatdinovm@mail.ru)*

Национальный исследовательский Томский государственный университет
(634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 36)

Аннотация. Приведены результаты исследования истории появления азотированных ферросплавов и развития технологий азотсодержащих сталей и лигатур. Важнейшими достоинствами азота как легирующего элемента являются его доступность и практически неограниченные запасы в природе. Технология добычи азота не причиняет окружающей среде никакого вреда и не сопровождается образованием отходов. Новые технологии азотированных ферросплавов и новые составы азотсодержащих лигатур возникали как ответ на создание новых марок сталей, легированных азотом. При этом наибольший вклад в развитие технологии азотированных сталей и ферросплавов внесли исследователи Европы, США и Советского Союза. Азотированный феррохром появился из необходимости легирования нержавеющей сталей различного класса. Азотированный феррованадий был создан для микролегирования высокопрочных низколегированных сталей. Для легирования азотом трансформаторной стали был разработан легирующий материал на основе нитрида кремния. Азотсодержащие композиции на основе марганца являются универсальными легирующими материалами широкого спектра применения. Технологии азотированных ферросплавов развивались в направлении создания составов с максимальным содержанием азота при минимальном расходе материальных ресурсов. Сейчас успешно развиваются технологии непосредственного введения газообразного азота в жидкий металл при выпечной обработке, легирование при помощи его твердых носителей остается универсальным способом выплавки азотсодержащих сталей. Азот в природе встречается исключительно в газообразном виде, поэтому для введения в сталь возникает необходимость его фиксации в составе какого-либо твердого вещества. При этом такой азотсодержащий материал должен быть совместим со стальным расплавом и технологичным при применении. Эту задачу полностью решает технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), позволяющая получать композиционные ферросплавы на основе нитридов со свойствами, недостижимыми для печного процесса.

Ключевые слова: азотированные ферросплавы, история ферросплавов, азотсодержащие стали, феррохром азотированный, феррованадий азотированный, марганец азотированный, композиционные ферросплавы, самораспространяющийся высокотемпературный синтез.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-773-781

Азот и железо. Их взаимодействие началось с первым куском металла, полученным человеком. Выплавка железа всегда осуществлялась в непосредственном контакте с воздухом, более чем на три четверти состоящем из азота. Поэтому не взаимодействовать они не могли. Степень влияния азота на свойства металла зависела от конкретных условий плавки и состава используемого сырья. Однако в течение веков металлургия железа развивалась, не предполагая и не учитывая такого взаимодействия.

Первые знания о наличии воздействия азота на свойства чугуна и стали начали появляться в середине XIX века в эпоху промышленных революций в Европе. Проведенные во второй половине XIX и начале XX веков исследования вынесли суровый приговор азоту как нежелательному компоненту стали, поставив его в один ряд с такими, уже ставшими классическими, вредными примесями, как сера, кислород и фосфор. К тому времени уже были изобретены различные способы выплавки стали: томасовский, бессемеровский и конвекторный. Были разработаны методики химическо-

го определения азота в металлах различного способа выплавки, что позволяло проанализировать пути его попадания в расплав. Полученные знания использовались для разработки методов борьбы с вредным влиянием азота. Накопленная информация стала отражаться в нормативных документах в виде предельно допустимых концентраций азота в металлах различного назначения. Чем ответственнее было предназначение чугуна и стали, тем более жесткие ограничения накладывались на их состав. Минимальное количество азота должно было быть в металле, предназначенном для изготовления орудий, инструментов и деталей вагонов [1 – 7].

Следует, однако, отметить, что отрицательное отношение к азоту, сложившееся к началу XX века, было оправдано. Тогда металлургия только начинала осваивать легированные стали. Еще не был известен механизм дисперсионного упрочнения металла и не была открыта нержавеющая сталь. Следовательно, не было материальной основы для проявления азота с положительной стороны. В аналогах тех составов углеродистых сталей, которые выплавлялись до Первой мировой

войны, азот и сейчас обычно является нежелательной примесью.

Начало радикальному изменению отношения к азоту было положено с наступлением эры нержавеющей стали в 20-е годы XX века. Для производства стойкого к коррозии металла потребовался в больших количествах феррохром, а в последующем и металлический хром. Появились исследования по взаимодействию сплавов хром – железо с азотом. Обнаружилось большое сродство их к азоту. Были получены сведения о положительном влиянии азота на макроструктуру некоторых промышленных железохромистых сплавов.

Впервые влияние азота на свойства сплавов Cr–Fe было исследовано Фрэнком Адкоком (Adcock Frank) в 1926 г. [8]. Он изучал растворение азота в сплавах, содержащих 0,21 – 58,5 % Cr, а также в хроме металлическом. После 30-минутной обработки расплава в атмосфере азота в индукционной печи и последующей быстрой закалки в хроме фиксировалось 3,9 % N. Близкие к этой величине значения растворимости были получены и многочисленными последующими исследователями. Азот значительно снижал температуру плавления хрома: сплав с 2,1 % N плавился в интервале 1580 – 1630 °С. Феррохром (54,0 % Cr) при тех же условиях растворял 1,83 % N. Растворенный азот повышал твердость сплавов и положительно воздействовал на их структуру.

По масштабам производства все ферросплавы и лигатуры делятся на три основные группы. К первой относятся сплавы на основе марганца (Fe–Mn, Mn–Si), кремния (Fe–Si, Si–Ca) и хрома (Fe–Cr, Fe–Cr–Si). Объемы их производства составляют многие миллионы тонн. Малая группа ферросплавов включает сплавы с объемом выплавки от десятков до сотен тысяч тонн в год (Fe–Mo, Fe–Ti, Fe–V, Fe–Nb и др.). В отдельную группу можно выделить сплавы с объемом производства от сотен до нескольких тысяч тонн в год. К этой самой многочисленной по номенклатуре группе и относятся лигатуры с азотом. Она включает также и сплавы с бором, серой, селеном, теллуром, редко- и щелочноземельными элементами и др. Часто такие лигатуры получают дополнительной обработкой традиционных ферросплавов в электропечах и отдельная статистика по объемам их производства и торговли не ведется. Для их выплавки используют металлургический процесс или вакуумтермическую технологию. Если составы ферросплавов первых двух групп стандартизированы и носят универсальный характер для производителей и потребителей всех стран, то сплавы третьей группы имеют весьма различающийся состав у различных производителей. Потребителями их являются металлургические заводы, специализирующиеся в выпуске уникальной продукции: металла для трансформаторов, рельсовой стали, высокопрочного крепежа и др.

Эпоха азотированных ферросплавов началась естественным образом с азотсодержащих легирующих спла-

вов на основе хрома. В одной из самых первых работ, посвященных исследованию влияния азота на свойства нержавеющей стали, для достижения требуемой его концентрации начал использоваться азотированный феррохром [9]. Автор не приводит его химического состава. Однако по количеству азота, введенного в сталь, этот материал должен был содержать 1,0 – 1,5 % N. Для достижения высокой степени усвоения азота автор рекомендовал вводить азотированный феррохром при возможно более низкой температуре. Было исследовано два сорта стали, чисто хромистая (1) и хромоникелевая с различным содержанием никеля (2 – 4):

1. Cr 19,37 – 26,08; C 0,10 – 0,12; N 0,27 – 0,28.
2. Cr 24,21 – 27 – 35; Ni 0,15 – 1,51; C 0,32 – 0,56; N 0,20 – 0,32.
3. Cr 18,13 – 18,25; Ni 8,67 – 8,71; C 0,075 – 0,18; N 0,21 – 0,20.
4. Cr 17,33 – 22,58; Ni 9,04 – 34,42; C 0,23 – 0,27; N 0,12 – 0,25.

Во всех случаях было достигнуто измельчение зерна, улучшение микроструктуры отливок и повышение механических свойств металла. Новые марки нержавеющей стали с азотом рекомендовались для изготовления изделий методом литья иковки. В 1931 г. автором этой публикации (Russell Franks) были поданы первые заявки на патенты на азотсодержащую нержавеющую хромистую сталь и способ ее выплавки с использованием нитридов хрома и азотированного феррохрома [10, 11]. Содержание азота в такой стали могло варьироваться в пределах 0,20 – 0,65 % при концентрации хрома 15 – 35 %.

В 1941 г. Franz Rapatz опубликовал первый обзор работ по влиянию азота на свойства коррозионностойких сталей различного состава: хромистых, марганцовистых, хромоникелевых и хромомарганцевых и впервые предложил считать стали легированными азотом, если его содержание в них превышает 0,05 % N [12]. В работе дается представление о химическом составе, технологии производства, способах термомеханической обработки и перспективах применения легированных азотом сталей. Подчеркивается, что азот расширяет диапазон устойчивости аустенита, а также дает ему более высокую вязкость, прочность, термостойкость и долговечность. Коррозионностойкую Cr – Ni – N сталь рекомендовано использовать для экономии никеля. Было отмечено, что Cr – Mn – N сталь имеет большую прочность по сравнению с хром- и хромомарганцевыми сталями при практически одинаковой коррозионной стойкости.

В России исследования по влиянию азота на железо и его сплавы были начаты в начале XX века Н.П. Чижевским [1 – 3, 13]. В 1910 г. были опубликованы первые результаты проведенных изысканий в Томском технологическом университете, определены основные причины загрязнения металла азотом и сформулированы принципы борьбы с ним [1]. Одним из путей

нейтрализации вредного воздействия азота на свойства стали Н.П. Чижевский видел в создании сплавов деазотаторов. Такие сплавы, по аналогии с уже хорошо зарекомендовавшими себя сплавами раскислителями, должны были при введении в расплав взаимодействовать с растворенным азотом с образованием нерастворимых его соединений – нитридов, которые впоследствии удалялись бы вместе со шлаком [2].

Чтобы определить сплавы – кандидаты на роль деазотирующих материалов, были проведены исследования по выявлению способности их насыщаться азотом. Среди выбранных материалов были как такие, уже хорошо зарекомендовавшие себя как раскислители, марганец и кремний, так и еще новые и экзотические для того времени сплавы, как феррованадий и ферротитан [2, 13]. Было определено, что феррованадий (33,5 % V) за 0,5 ч при 1200 – 1300 °С поглощал ~8 % N. Состав его близок к азотированному феррованадию, получаемому современным вакуумтермическим способом [14].

Изучая взаимодействие полученных азотированных сплавов с расплавом железа, Н.П. Чижевский обнаружил, что все они активно растворяются в стальной ванне и, следовательно, не могут быть использованы для удаления азота из металла. Впоследствии для борьбы с азотом Чижевским Н.П. была предложена вакуумная технология обработки расплава, являющаяся и в настоящее время одним из основных способов рафинирования стали. Однако результаты, полученные им при изучении процесса насыщения азотом металлов и ферросплавов с целью нейтрализации его вредного воздействия, были востребованы только через десятки лет уже для создания производств азотированных легирующих материалов.

Как только в 30-х годах возникла потребность введения азота в нержавеющие стали, начали разрабатываться и способы получения азотсодержащих лигатур хрома. Одним из первых для этих целей была адаптирована металлотермия. Например, после металлотермической реакции в шихте, состоящей из ферросиликохрома, нитрата натрия и извести, образовывался азотированный феррохром с ~1 % N [15]. В другом случае при производстве феррохрома в дуговой печи на завершающей стадии плавки предлагалось продувать азотсодержащий газ через образовавшийся металлический расплав. По такой технологии было возможно выплавлять азотированный углеродистый феррохром, содержащий примерно 60 % Cr, 5 % C и 2 % N [16].

Параллельно с использованием специально полученных лигатур разрабатывались способы непосредственного азотирования стального расплава. В работе [17] хромистую сталь предлагалось получать выдержкой расплава в атмосфере азота. После часа такой обработки в стали с 17,3 % Cr было достигнуто 0,09 % N при 0,10 % C. В работе [18] такую обработку рекомендовалось производить при повышенном давлении азота. При

этом ускорялся процесс насыщения расплава азотом и достигалось более высокое его содержание в слитке.

В работах [19, 20] азот в хромистую сталь предлагалось вводить с помощью порошков карбонитридов титана и циркония. Разброс степени усвоения азота был велик (31 – 93 %). Этот способ не нашел практического применения в металлургии, так как при высокой концентрации азота нитриды Ti и Zr выделяются в слитке в виде крупных частиц и отрицательно влияют на свойства металла.

Общим для создаваемых первых технологий было стремление приспособить уже существующие способы получения обычных сплавов для выплавки лигатур с азотом. Поэтому в 30 – 40-е годы производились исключительно плавленные лигатуры с низким содержанием азота. Специализированных технологий для получения высокоазотистых лигатур еще не было создано.

В Советском Союзе работы по получению азотированных сталей были начаты в начале 30-х годов. В 1935 г. появилась работа В.С. Емельянова, посвященная анализу влияния азота на свойства аустенитной хромоникелевой стали типа 18-8 [21]. Было показано, что добавка 0,2 % азота повышает пределы прочности и текучести стали, но при этом несколько снижает ее ударную вязкость. С февраля 1930 г. В.С. Емельянов проработал семь месяцев в Эссене на заводе Круппа, а затем с марта 1932 по 21 апреля 1935 г. на этом же заводе был руководителем советских инженеров и техников, направленных в Германию для изучения методов производства стали. За эти годы он посетил заводы не только Германии, но и других стран Европы. По возвращении в мае 1935 г. его назначили техническим директором только что построенного ферросплавного завода в Челябинске, где он проработал до 1937 г.

В 30 – 40-е годы работы по получению азотированных сталей и ферросплавов проводились под руководством А.М. Самарина [22 – 29]. В 1938 г. были опубликованы первые две его работы [22, 23]. В них приведены результаты опробования различных способов азотирования феррохрома, в частности обработка расплава азотсодержащими солями KNO_3 , NH_4NO_3 (0,049 – 0,063 % N) и продувка расплава азотсодержащими газами 0,061 – 0,120 % N (N_2); 0,081 – 0,260 % N (NH_3). При твердофазном азотировании стружки феррохрома аммиаком содержание азота достигло 0,48 % N.

В 1934 – 1936 гг. А.М. Самарин был направлен в Америку, где изучал процессы взаимодействия различных газов со стальным расплавом. Он ознакомился с работой металлургических заводов и лабораторий, прослушал курсы на химическом факультете Мичиганского университета. К тому времени там уже появились работы, посвященные положительному влиянию азота на свойства нержавеющих сталей [6, 9]. Возможно, исследования А.М. Самарина и В.С. Емельянова по азотированию были навеяны полученной в зарубежных командировках информацией.

Для выплавки хромистого сплава фурудит А.М. Самариным был использован азотированный хром [22]. А путем продувки аммиака через расплав углеродистого (58,59 % Cr, 4,28 % C) и безуглеродистого (58,94 % Cr, 0,11 % C) феррохрома были получены сплавы, содержащие до 0,60 и 0,64 % N [23].

Таким образом, уже первые исследования показали, что высокоазотистые сплавы на основе хрома, полученные различными способами, позволяют выплавлять нержавеющие стали, содержащие до 0,64 % N при высоком и стабильном коэффициенте его усвоения (66 – 89 %). Азот способствовал устранению транскристаллизации и получению мелкозернистой структуры. Чем выше содержание азота, тем мельче было зерно и выше прочность и ударная вязкость. Состав сплава фурудит и достигнутые в результате азотирования свойства близки к составу и свойствам сплава, исследованного в работе [9].

На важность работ по азотированию стали и ферросплавов указывает то, что они не прекращались и во время войны [24 – 26]. В частности, впервые было опробовано твердофазное азотирование низкоуглеродистого феррохрома и металлического хрома и использование азотированного ферротитана. Дробленный Cr, Fe–Cr или Fe–Ti помещали в трубчатую печь и выдерживали в токе азота в течение нескольких часов (соответственно 1200 – 1300 °C × 1,7 ч., 900 °C × 4 ч., 900 – 950 °C × 6 ч.). Азотированные Cr, Fe–Cr далее были переплавлены с получением слитков с 2,65 и (1,39 – 2 – 85) % азота, которые были использованы далее для выплавки аустенитной Cr–Ni стали. Азотированный ферротитан использовался непосредственно в виде порошка без предварительного переплава. В работе [26] для легирования высокохромистой стали азотом использовался уже сплав с ~5 % N. Такой сплав был, видимо, получен твердофазным азотированием дробленного хрома.

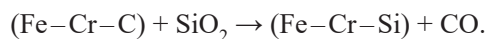
После войны были проведены более фундаментальные исследования по растворимости азота в хромистых сплавах и их свойствам. Разработан ГОСТ на азотированный феррохром [27 – 29]. Совершенствовалась технология металлургического азотированного феррохрома. В частности, хромистый концентрат в шихте был заменен на силикохром [30]. В 1949 г. на Ключевском ферросплавном заводе была освоена первая отечественная промышленная технология выплавки азотистого феррохрома. Производство базировалось на основе внепечного алюминотермического процесса.

Дальнейшее развитие металлургии азотсодержащих сталей во многом тормозилось отсутствием недорогих высокоазотированных лигатур. Оптимизация алюминотермической технологии позволила лишь незначительно повысить содержание азота в феррохроме. Безлигатурные способы выплавки оказались дорогими и нетехнологичными. Для экономически

приемлемой технологии высокоазотистых нержавеющих сталей требовался феррохром с большим содержанием азота.

В начале 50-х годов была изобретена клапанная сталь, широко применяемая до настоящего времени. Особенностью новой стали было высокое (до 0,60 %) содержание азота [31]. Массово стали выплавляться нержавеющие стали серии 200, в которых никель частично или полностью был заменен марганцем и азотом [32, 33]. Это послужило дополнительным импульсом для разработки технологий высокоазотистых лигатур. Наиболее простым путем достижения этой цели мог бы стать способ насыщения порошка низкоуглеродистого феррохрома в вакуумных печах. Однако из-за плохой дробимости сплава такой способ в то время был трудно реализуем.

Важную роль в технологии азотированных лигатур сыграло создание симплекс (simplex) процесса [34 – 36]. В первоначальном варианте этой технологии обезуглероживание феррохрома осуществлялось окисью кремния в вакуумной печи. При этом удалялась и большая часть серы [34]:



К недостатку такого способа можно отнести переход кремния в продукт: Cr 68,1; Fe 26,8; C 4,7; S 0,12; Si 1,46 → Cr 66,9; Fe 25,5; C 0,01; S 0,009; Si 6,2. Позже симплекс технология была модернизирована. В качестве окислителя стали пробовать оксиды железа, хрома и хромовую руду [35].

В работе [36] этот способ применили для азотирования. По окончании стадии обезуглероживания в вакуумную печь подавали азот при минимальном избыточном давлении. Продукт содержал до 7 % азота при минимальной концентрации углерода. При этом концентрация кремния достигала 6 %. Однако наиболее эффективным оказалось использование в качестве источника кислорода окисленного углеродистого феррохрома [37 – 39]:

1. $(\text{Fe}-\text{Cr}-\text{C}) + \text{O}_2 \rightarrow \text{Fe}-\text{Cr}-\text{C}-\text{O}$ ($\text{O} \approx 8 - 13 \%$);
2. $(\text{Fe}-\text{Cr}-\text{C}) + \text{Fe}-\text{Cr}-\text{C}-\text{O} \rightarrow (\text{Fe}-\text{Cr}) + \text{CO}$;
3. $(\text{Fe}-\text{Cr}) + \text{N}_2 \rightarrow \text{Fe}-\text{Cr}-\text{N}$.

Этот вариант вакуумной термической технологии был освоен на Актюбинском заводе ферросплавов. Обезуглероживание – азотирование осуществлялось в вакуумной печи ОКБ-554А. Две марки такого сплава были включены в новый ГОСТ 4757-67 на феррохром. Новая технология позволяла получать лигатуры 4 – 8 % N и 0,01 – 0,06 % C [40]. При этом концентрация остаточного кислорода составляла 1 – 2 %.

В работе [41] был предложен способ получения высокоазотистого низкоуглеродистого феррохрома путем низкотемпературной (500 – 800 °C) обработки порошка углеродистого феррохрома аммиаком или смесью его с азотом. Способ позволяет производить сплав

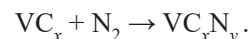
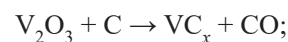
с ~15 % N в порошкообразной форме без применения вакуума. Однако он не нашел практического применения вследствие образования большого количества цианистоводородной кислоты.

Расширение производства содержащих марганец нержавеющей сталей с азотом сделало возможным использование для их выплавки лигатур на его основе. Росту применения таких лигатур способствовало и создание низколегированных сталей, упрочненных нитридами [42, 43]. Азотированный марганец (ферро-марганец, силикомарганец) в сравнении с феррохромом имеет ряд преимуществ. Марганец и его сплавы сравнительно легко дробятся в порошок и азотируются при более низких температурах (800 – 900 °С). Недостатками технологии азотированных марганцевых сплавов являются взрывоопасность и токсичность их тонких порошков и сравнительно низкая термостабильность высших нитридов Mn_6N_5 , Mn_3N_2 , Mn_5N_2 .

Впервые азотированный марганец опробован при выплавке клапанной стали [44]. Была разработана установка непрерывного азотирования порошка марганца в электропечи во вращающихся барабанах [45, 46]. Аналогичная установка использована при производстве азотированного марганца на Запорожском заводе ферросплавов [47].

Важным этапом в развитии технологии азотированных лигатур стало создание сплавов на основе ванадия. Способствовали этому разработка и широкое распространение высокопрочных низколегированных сталей, упрочнение в которых достигалось микродобавками ванадия и азота [42, 43]. Практически одновременно появились две технологии производства азотсодержащих лигатур на основе ванадия. В первом случае [48] источником ванадия являлась его пятиокись, во втором – трехокись [49]. Из V_2O_5 алюминотермическим способом получали сплав с 70 – 80 % V и 17 – 27 % Mn. Такой V–Mn материнский сплав измельчали в порошок и азотировали при температуре 900 – 1100 °С. Марганец позволял осуществлять азотирование при более низкой температуре, исключить плавление продукта и получать в нем до 17 % N. Перед введением в стальную расплав такой азотсодержащий порошкообразный материал брикетировался. Степень усвоения азота составляла 65 – 93 %. В работе [50] при азотировании порошка алюминотермического феррованадия (80,2 % V) дисперсностью –0,6 мм был получен продукт с 70,5 – 71,5 % V и 10,5 – 11,0 % N. Плотность спеков азотированного сплава составляла около 3,5 г/см³.

По другой технологии восстановление ванадия осуществляют углеродом в вакуумной печи при температуре 1200 – 1400 °С с использованием в качестве сырья трехокси, имеющей более высокую температуру плавления (1980 °С). По завершении реакции, которое фиксируется по отсутствию газовой выделения, в печь подается азот:



В результате такого азотирования образуются брикеты карбонитрида ванадия плотностью ~2,8 г/см³ [49].

С ростом объемов производства азотсодержащих сталей и расширением их сортамента изменялась и номенклатура лигатур для достижения повышенной концентрации азота. Наряду с усовершенствованием состава и структуры сплавов на основе Cr, Mn и V начали применяться азотсодержащие соединения из других областей промышленности. У химиков было заимствовано высокоазотистое соединение цианамид кальция $CaCN_2$ (~23 % N) [51, 52]. А с появлением технологии выплавки трансформаторной стали с нитридным ингибированием и технологии производства сверхвысокоазотистых сталей начали применять лигатуры на основе керамического соединения Si_3N_4 (~39 % N) [53, 54].

В настоящее время в мире производятся азотсодержащие лигатуры на основе Mn, Cr, V и Si. Для их производства обычно применяют вакуум-термическую технологию. Лигатуры на основе ванадия массово применяют при выплавке высокопрочных низколегированных сталей для строительства (~0,015 % N) и рельсовых сталей низкотемпературной надежности (~0,012 % N). Азотированный феррохром используют при выплавке нержавеющей сталей с особыми свойствами: для бандажных колец турбогенераторов (0,4 – 0,9 % N), клапанов для различных двигателей (0,3 – 0,6 % N), высокопрочные нержавеющей стали с пониженным содержанием никеля (0,08 – 0,45 % N) и др. Азотированный ферросилиций эффективен при производстве трансформаторной стали с нитридным ингибированием (~0,01 % N). Сплавы на основе марганца наиболее универсальные лигатуры с широким спектром применения.

Вместе с тем весь спектр современных азотсодержащих легирующих материалов можно производить принципиально новым способом, разработанным в 80-е годы [55]. На основе фундаментальных и прикладных исследований закономерностей и механизма бескислородного горения сплавов созданы научные основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) композиционных материалов для металлургии и впервые в мире разработаны и освоены промышленные и опытно-промышленные СВС технологии композиционных ферросплавов и лигатур [56 – 63].

Основная научно-техническая идея, заложенная в новой технологии, заключается в разработке концепции «металлургического СВС» процесса. Впервые бескислородное горение было реализовано в системах с участием сплавов железа и создан новый класс материалов – композиционные ферросплавы на основе нитридов. Металлургические СВС технологии композиционных азотированных ферросплавов основаны на процессах фильтрационного горения при высоком дав-

лении, а также горения в режимах спутной фильтрации и термического сопряжения.

Созданное многотоннажное специализированное ресурсосберегающее экологически безопасное производство композиционных ферросплавов на основе нитридов решает проблему производства различных марок сталей, легированных азотом.

Мощность «металлургического СВС» производства составляет 5 тыс. т в год. Все технологии и материалы защищены патентами России, Европы, США, Японии и Китая. Metallургический СВС позволяет получать композиционные материалы с комплексом свойств, не достижимым для традиционных печных технологий и обеспечивает снижение удельного расхода лигатур.

Выводы. Таким образом, несмотря на то, что сейчас успешно развиваются технологии непосредственного введения газообразного азота в жидкий металл при внепечной обработке, легирование при помощи его твердых носителей остается универсальным способом выплавки азотсодержащих сталей. Важнейшими достоинствами азота как легирующего элемента являются его доступность и практически неограниченные запасы в природе. Технология добычи азота не причиняет окружающей среде никакого вреда и не сопровождается образованием отходов. Азот в природе встречается исключительно в газообразном виде, поэтому для введения в сталь возникает необходимость его фиксирования в составе какого-либо твердого вещества. При этом такой азотсодержащий материал должен быть совместим со стальным расплавом и технологичным при применении. Эту задачу полностью решает технология металлургического СВС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чижевский Н.П., Привалов И. Железо и азот // Вестник технологии химической и строительных материалов. 1910. № 5 – 6. С. 97 – 104.
2. Чижевский Н.П. Железо и азот. Экспериментальное исследование количества азота и причин содержания его в чугуне, стали и железе // Изв. Томского технологического института. 1913. Т. 31. № 3. С. 1 – 91.
3. Tschischewski N.P. The occurrence and influence of nitrogen on iron and steel // The Journal of the Iron and Steel Institute. 1915. Vol. 92. No. 2. P. 47 – 97.
4. Braune H. Über die Bedeutung des Stickstoffes im Eisen // Stahl und Eisen. 1906. No. 22. S. 1357 – 1363; No. 23. S. 1431 – 1437; No. 24. S. 1496 – 1499.
5. Свечников В.Н. Азот в техническом железе // Журнал Русского металлургического общества. 1928. № 1. Ч. 1. С. 36 – 58.
6. Scott F.W. Effect of nitrogen on steel // Industrial and Engineering Chemistry. 1931. Vol. 23. No. 9. P. 1036 – 1051.
7. Вейнберг Г.Я., Прошутинский С. Азот в стали // Metallurg. 1938. № 2. С. 95 – 103.
8. Adcock F. The effect of nitrogen on chromium and some iron – chromium alloys // The Journal of the Iron and Steel Institute. 1926. Vol. 114. No. 11. P. 117 – 126.
9. Franks R. Chromium steels improved by nitrogen // The Iron Age. 1933. No. 7. P. 10 – 13.
10. Pat. 1990 589 US. Alloy steel / Franks R., Heighs J. Publ. 12.02.1935.
11. Pat. 1990 591 US. Method of producing chromium steel castings / Franks R., Heighs J. Publ. 12.02.1935.
12. Rapatz F. Verwendungsmöglichkeiten von nichtrostenden und hitzebeständigen Stählen mit Stickstoffzusatz // Stahl und Eisen. 1941. B. 61. No. 48. S. 1073 – 78.
13. Чижевский Н.П., Блинов Н. Титан, ванадий и азот. Влияние титана и ванадия на содержание азота в железе и его сплавах // Журнал Русского металлургического общества. 1914. № 5. Ч. 1. С. 636 – 646.
14. Грищенко С.Г., Матвиенко В.А., Саранкин В.А. и др. Разработка и освоение технологии производства азотированного феррованадия на Запорожском заводе ферросплавов // Сталь. 1982. № 7. С. 42 – 44.
15. Pat. 2027837 US. Process for making alloys / Read W.C. Publ. 14.01.1936.
16. Pat. 2058494 US. Production of ferroalloy / Ostrofsky J.N. Publ. 27.10.1936.
17. Pat. 2069205 US. Method of producing iron chromium alloys of appreciable nitrogen content / Arness W.B. Publ. 2.02.1937.
18. Pat. 2745740 US. Process of preparing an iron base melt / Jackson P.L., Zackay V.F. Publ. 15.05.1956.
19. Pat. 2098567 US. Method of incorporating nitrogen in alloy steels / Comstock G.F. Publ. 9.11.1937.
20. Comstock G.F. Incorporating nitrogen in chromium steels by titanium cyanonitride // Metal Progress. 1938. Vol. 33. No. 3. P. 269 – 274.
21. Емельянов В.С. Влияние азота на свойства стали // Качественная сталь. 1935. № 5. С. 40 – 48.
22. Самарин А.М., Королев М.Л. Опыты насыщения азотом феррохрома // Metallurg. 1938. № 2. С. 77 – 84.
23. Самарин А. М., Королев М. Л., Паисов И. В. Влияние азота на хромсодержащие сплавы // Metallurg. 1938. № 11. С. 80 – 85.
24. Самарин А.М., Яскевич А., Паисов И.В. Влияние азота на свойства нержавеющей стали // Изв. АН СССР. Отделение технических наук. 1943. № 5 – 6. С. 71 – 77.
25. Самарин А.М. Замена никеля азотом в жароупорной стали // Изв. АН СССР. Отделение технических наук. 1944. № 1 – 2. С. 54 – 57.
26. Самарин А.М. О свойствах азотсодержащей нержавеющей стали // Изв. АН СССР. Отделение технических наук. 1944. № 12. С. 858 – 863.
27. А. с. 71095 СССР. Класс 18b. Способ внепечной выплавки азотистого феррохрома / Самарин А.М., Филиппов С.И. Заявлено 8.02.1946.
28. Мозговой В. С., Самарин А. М. Растворимость азота в жидком хrome и расплавах хрома и кремния // Изв. АН СССР. Отделение технических наук. 1950. № 10. С. 1529 – 1536.
29. Мозговой В. С., Самарин А. М. Растворимость азота в расплавах хрома и углерода, хрома и железа, хрома, железа и углерода // Физико-химические основы производства стали. – М.: Из-во АН СССР, 1957. С. 586 – 589.
30. Игнатенко Г.Ф., Плинер Ю.Л., Лаппо С.И. и др. Технология выплавки высокоазотированного безуглеродистого феррохрома алюминотермическим методом // Сталь. 1960. № 9. С. 817 – 818.
31. Pat. 2602738 US. High-temperature steel / Jennings P.A. Publ. 08.07.1952.
32. Zackay V.F., Carlson J.F., Jackson P.L. High nitrogen austenitic Cr-Mn steels // Transaction ASM. 1955. Vol. 48. P. 509 – 523.
33. Виткина Э.И. Некоторые стали и сплавы новых марок, применяемые за рубежом в послевоенные годы // Черная металлургия капиталистических стран. Часть V. – М.: Металлургиздат, 1957. С. 5 – 58.
34. Pat. 2473019 US. Production of ferrochromium / Erasmus H. de W. Publ. 14.06.1949.
35. Pat. 2831761 US. Method for producing low-carbon ferrochromium / Cooper H.S. Publ. 22.04.1958.
36. Pat. 2797156 US. Nitrogen-bearing ferrochromium / Saunders E.R., Harbrecht W.L. Publ. 25.06.1957.

37. А. с. 108953 СССР. Класс 18d. Способ получения малоуглеродистого и безуглеродистого феррохрома с азотом / Кириченко И.Д. Заявлено 26.12.1956.
38. Кириченко И.Д. Новый способ получения безуглеродистого феррохрома // *Сталь*. 1958. № 2. С. 131 – 137.
39. Chadwick C.G. Manufacture of simplex ferrochrome by the vacuum process // *JOM*. 1961. Vol. 13. No. 11. P. 806 – 808.
40. Безобразов С.В., Дубровин А.С., Кузнецов В.Л. и др. Качество хромистых ферросплавов // *Производство ферросплавов*. – Челябинск: Южно-Уральское книжное издательство, 1973. Вып. 2. С. 104 – 117.
41. Pat. 3595709 US. Process for production ferrochrome alloys with high nitrogen content and low carbon content / Sordillo G., Cassaro F. Publ. 27.07.1971.
42. Wiester H.-J., Vogels H.A., Ulmer H. Legierungselement in Mangan-Vanadin-Baustählen aus dem Siemens-Martin – Ofen // *Stahl und Eisen*. 1959. Bd. 79. No 16. S. 1120 – 1129.
43. Гольдштейн М.И., Гринь А.В., Блюм Э.Э., Панфилова Л.М. Упрочнение конструкционных сталей нитридами. – М.: Металлургия, 1970. – 224 с.
44. Pat. 2696433 US. Production of high nitrogen manganese alloy / Tanczyn H. Publ. 07.12.1954.
45. Pat. 2860080 US. Method for continuously producing thermally stable nitratedmanganese / Wanamaker E.M., Forbes D.D. Publ. 11.11.1958.
46. Перепелкин В.П., Боголюбов В.А. Высокоазотистые легирующие сплавы // *Сталь*. 1960. № 9. С. 813 – 816.
47. Перепелкин В.П., Матюшенко Н.К., Зельдин В.С., Проценко И.Г. Производство азотированного марганца на Запорожском заводе ферросплавов // *Сталь*. 1971. № 7. С. 616.
48. Pat. 3304175 USA. Nitrogen-containing alloy and its preparation / Madsen S.W., Payer E.L. Publ. 14.02.1967.
49. Pat. 3334992 USA. Vanadium-containing addition agent and its process for producing same / Downing G.H., Merkert R.F. Publ. 8.08.1967.
50. Pat. 1558500 Germany. Gesinterte stickstoffhaltige Vorlegierungen für das Legieren von Stähle / Fichte R., Franke H., Reteistorf H.G. Publ. 01.07.1971.
51. Пиньес П., Зезулова З. Легирование стали азотом с помощью органических веществ // *Сталь*. 1959. № 7. С. 625 – 626.
52. Franke H., Fuchs A. Stickstoffhaltige geschmolzene Legierungen und Sinter Produkte // *Nene Hutte*. 1966. No. 10. S. 604 – 606.
53. Pant P., Dahlmann P., Schlump W., Stein G. A new nitrogen alloying technique – a way to distinctly improve the properties of austenitic steel // *Steel Research*. 1987. No. 1. P. 18 – 25.
54. Сеничев Г.С., Тахаутдинов Р.С., Бодяев Ю.А. и др. Совершенствование технологии выплавки трансформаторной стали в конверторном цехе ОАО ММК // *Сталь*. 2006. № 3. С. 17 – 22.
55. Pat. 2080785 GB. Int. cl. C22C 1/04. B22F 3/12. Production of metallic composition / M.Kh. Ziatdinov, J.M. Maksimov, A.D. Kolmakov etc. Publ. 24.04.1985.
56. Зиятдинов М.Х., Шатохин И.М. Перспективы производства и применения СВС-нитрида ферросилиция // *Сталь*. 2008. № 1. С. 26 – 31.
57. Зиятдинов М.Х., Шатохин И.М. Опыт разработки, производства и применения СВС-материалов для металлургии // *Металлург*. 2008. №12. С. 50 – 55.
58. Зиятдинов М.Х., Шатохин И.М. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез азотированного феррохрома // *Сталь*. 2009. № 9. С. 48 – 53.
59. Зиятдинов М.Х., Шатохин И.М. Производство СВС-нитрида феррованадия для выплавки высокопрочных низколегированных сталей // *Сталь*. 2009. № 11. С. 39 – 46.
60. Зиятдинов М.Х. Горение хрома в спутном потоке азота // *Физика горения и взрыва*. 2016. Т. 52. № 4. С. 51 – 60.
61. Зиятдинов М.Х., Шатохин И.М., Леонтьев Л.И. Технология СВС композиционных ферросплавов. Часть I. Металлургический СВС процесс. Синтез нитридов феррованадия и феррохрома // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2018. Т. 61. № 5. С. 339 – 347.
62. Зиятдинов М.Х., Шатохин И.М., Леонтьев Л.И. Технология СВС композиционных ферросплавов. Часть II. Синтез нитрида ферросилиция и борида ферротитана // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2018. Т. 61. № 7. С. 527 – 535.
63. Ziatdinov M.Kh. Metallurgical SHS processes as a route to industrial-scale implementation: An autoreview // *Int. Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 2018. Vol. 27. No. 1. P. 1 – 13.
64. Shatokhin I.M., Ziatdinov M.Kh., Manashev I.R. etc. Self-propagating high-temperature synthesis (SHS) of composite ferroalloys // *CIS Iron and Steel Review*. 2019. Vol. 18. P. 52 – 57.

Поступила в редакцию 4 сентября 2020 г.

После доработки 9 сентября 2020 г.

Принята к публикации 20 октября 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 10, pp. 773–781.

FROM THE HISTORY OF NITRIDED FERROALLOYS

M.Kh. Ziatdinov

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

Abstract. The article considers research on the history of nitrided ferroalloys appearance and development of technologies for nitrogen-containing steels and ligatures. The most important advantages of nitrogen as an alloying element are its availability and almost unlimited reserves in nature. The technology of nitrogen extraction does not cause any harm to the environment and is not accompanied by the formation of waste. New technologies of nitrided ferroalloys and new compositions of nitrogen-containing ligatures emerged as a response to the creation of new grades of nitrogen-alloyed steels. At the same time, researchers in Europe, the United States, and the Soviet Union made the greatest contribution to the development of nitrided steel and ferroalloys technology. Nitrided ferrochrome emerged from the need for alloying stainless steels of various classes. Nitrided ferrovanadium was created for microalloying high-strength low-alloy steels. For nitrogen alloying of transformer steel, an alloying material based on silicon nitride was developed. Nitrogen-containing compositions based on manga-

nese are universal alloying materials for a wide range of applications. Technologies of nitrided ferroalloys developed in the direction of creating compositions with the maximum nitrogen content with minimal consumption of material resources. Currently, technologies for direct introduction of nitrogen gas into liquid metal during out-of-furnace processing are being successfully developed. Alloying with its solid carriers remains a universal method for smelting nitrogen-containing steels. Nitrogen in nature occurs exclusively in a gaseous form, so for introduction to steel, it is necessary to fix it in the composition of a solid substance. At the same time, such a nitrogen-containing material must be compatible with the steel melt and technological in use. This problem is completely solved by the technology of self-propagating high-temperature synthesis (SHS), which allows obtaining composite ferroalloys based on nitrides, with properties that are unattainable for the furnace process.

Keywords: nitrided ferroalloys, history of ferroalloys, nitrogen-containing steels, nitrided ferrochrome, nitrided ferrovanadium, nitrided manganese, composite ferroalloys, self-propagating high-temperature synthesis.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-773-781

REFERENCES

1. Chizhevskii N.P., Privalov I. Iron and nitrogen. *Vestnik tekhnologii khimicheskoi i stroitel'nykh materialov*. 1910, no. 5-6, pp. 97–104. (In Russ.).
2. Chizhevskii N.P. Iron and nitrogen. Experimental study of the amount of nitrogen and the causes of its content in cast iron, steel and iron. *Izv. Tomskogo tekhnologicheskogo instituta*. 1913, vol. 31, no. 3, pp. 1–91. (In Russ.).
3. Tschischewski N.P. The occurrence and influence of nitrogen on iron and steel. *The Journal of the Iron and Steel Institute*. 1915, vol. 92, no. 2, pp. 47–97.
4. Braune H. Über die Bedeutung des Stickstoffes im Eisen. *Stahl und Eisen*. 1906, no. 22, S. 1357–1363; no. 23, S. 1431–1437; no. 24, S. 1496–1499. (In Germ.).
5. Svechnikov V.N. Nitrogen in the technical iron. *Zhurnal Russkogo metallurgicheskogo obshchestva*. 1928, no. 1, Part 1, pp. 36–58. (In Russ.).
6. Scott F.W. Effect of nitrogen on steel. *Industrial and Engineering Chemistry*. 1931, vol. 23, no. 9, pp. 1036–1051.
7. Veinberg G.Ya., Proshutinskii S. Nitrogen in steel. *Metallurg*. 1938, no. 2, pp. 95–103. (In Russ.).
8. Adcock F. The effect of nitrogen on chromium and some iron – chromium alloys. *The Journal of the Iron and Steel Institute*. 1926, vol. 114, no. 11, pp. 117–126.
9. Franks R. Chromium steels improved by nitrogen. *The Iron Age*. 1933, no. 7, pp. 10–13.
10. Franks R., Heighs J. *Alloy Steel*. Pat. 1990 589 US. Publ. 12.02.1935.
11. Franks R., Heighs J. *Method of Producing Chromium Steel Castings*. Pat. 1990 591 US. Publ. 12.02.1935.
12. Rapatz F. Verwendungsmöglichkeiten von nichtrostenden und hitzebeständigen Stählen mit Stickstoffzusatz. *Stahl und Eisen*. 1941, B. 61, no. 48, S. 1073–78. (In Germ.).
13. Chizhevskii N.P., Blinov N. Titanium, vanadium, and nitrogen. Effect of titanium and vanadium on nitrogen content in iron and its alloys. *ZhRMO*. 1914, no. 5, Part 1, pp. 636–646. (In Russ.).
14. Grishchenko S.G., Matvienko V.A., Sarankin V.A. etc. Development of technology for the production of nitrided ferrovanadium at the Zaporozhye Ferroalloy Plant. *Stal'*. 1982, no. 7, pp. 42–44. (In Russ.).
15. Read W.C. *Process for Making Alloys*. Pat. 2027837 US. Publ. 14.01.1936.
16. Ostrofsky J.N. *Production of Ferroalloy*. Pat. 2058494 US. Publ. 27.10.1936.
17. Arness W.B. *Method of Producing Iron Chromium Alloys of Appreciable Nitrogen Content*. Pat. 2069205 US. Publ. 2.02.1937.
18. Jackson P.L., Zackay V.F. *Process of Preparing an Iron Base Melt*. Pat. 2745740 US. Publ. 15.05.1956.
19. Comstock G.F. *Method of Incorporating Nitrogen in Alloy Steels*. Pat. 2098567 US. Publ. 9.11.1937.
20. Comstock G.F. Incorporating nitrogen in chromium steels by titanium tyanonitride. *Metal Progress*. 1938, vol. 33, no. 3, pp. 269–274.
21. Emel'yanov V.S. Effect of nitrogen on steel properties. *Kachestvennaya stal'*. 1935, no. 5, pp. 40–48. (In Russ.).
22. Samarin A.M., Korolev M.L. Experiments on nitrogen saturation of ferrochrome. *Metallurg*. 1938, no. 2, pp. 77–84. (In Russ.).
23. Samarin A.M., Korolev M.L., Paisov I.V. Effect of nitrogen on chromium-containing alloys. *Metallurg*. 1938, no. 11, pp. 80–85. (In Russ.).
24. Samarin A.M., Yaskevich A., Paisov I.V. Effect of nitrogen on the properties of stainless steel. *Izv. AN SSSR, OTN*. 1943, no. 5-6, pp. 71–77. (In Russ.).
25. Samarin A.M. Replacing nickel with nitrogen in heat-resistant steel. *Izv. AN SSSR, OTN*. 1944, no. 1-2, pp. 54–57. (In Russ.).
26. Samarin A.M. Properties of nitrogen-containing stainless steel. *Izv. AN SSSR, OTN*. 1944, no. 12, pp. 858–863. (In Russ.).
27. Samarin A.M., Filippov S.I. *Sposob vnepechnoi vyplavki azotistogo ferrokroma* [Method of extra-furnace smelting of nitrogenous ferrochrome]. Certificate of authorship SSSR no. 71095. Publ. 08.02.1946. (In Russ.).
28. Mozgovoi V.S., Samarin A.M. Solubility of nitrogen in liquid chromium and melts of chromium and silicon. *Izv. AN SSSR, OTN*. 1950, no. 10, pp. 1529–1536. (In Russ.).
29. Mozgovoi V.S., Samarin A.M. Solubility of nitrogen in melts of chromium and carbon, chromium and iron, chromium, iron and carbon. In: *Fiziko-khimicheskie osnovy proizvodstva stali* [Physicochemical Basics of Steel Production]. Moscow: Iz-vo AN SSSR, 1957, pp. 586–589. (In Russ.).
30. Ignatenko G.F., Pliner Yu.L., Lappo S.I. etc. Technology for smelting high-nitrogen carbon-free ferrochrome using the aluminothermic method. *Stal'*. 1960, no. 9, pp. 817–818. (In Russ.).
31. Jennings P.A. *High-Temperature Steel*. Pat. 2602738 US. Publ. 08.07.1952.
32. Zackay V.F., Carlson J.F., Jackson P.L. High nitrogen austenitic Cr–Mn steels. *Transaction ASM*. 1955, vol. 48, pp. 509–523.
33. Vitkina E.I. Some steels and alloys of new grades used abroad in the post-war years. In: *Chernaya metallurgiya kapitalisticheskikh stran* [Ferrous Metallurgy of Capitalistic Countries]. Part V. Moscow: Metallurgizdat, 1957, pp. 5–58. (In Russ.).
34. Erasmus H. de W. *Production of Ferrochromium*. Pat. 2473019 US. Publ. 14.06.1949.
35. Cooper H.S. *Method for Producing Low-Carbon Ferrochromium*. Pat. 2831761 US. Publ. 22.04.1958.
36. Saunders E.R., Harbrecht W.L. *Nitrogen-Bearing Ferrochromium*. Pat. 2797156 US. Publ. 25.06.1957.
37. Kirichenko I.D. *Sposob polucheniya malouglerodistogo i bezuglerodistogo ferrokroma s azotom* [Method for producing low-carbon and carbon-free ferrochrome with nitrogen]. Certificate of authorship SSSR no. 108953. Publ. 26.12.1956. (In Russ.).
38. Kirichenko I.D. New method for producing carbon-free ferrochrome. *Stal'*. 1958, no. 2, pp. 131–137. (In Russ.).
39. Chadwick C.G. Manufacture of simplex ferrochrome by the vacuum process. *JOM*. 1961, vol. 13, no. 11, pp. 806–808.
40. Bezobrazov S.V., Dubrovin A.S., Kuznetsov V.L. etc. Quality of chromium ferroalloys. In: *Proizvodstvo ferrosplavov. Issue 2* [Production of Ferroalloys]. Chelyabinsk: Yuzhno-Ural'skoe knizhnoe izdatel'stvo, 1973, pp. 104–117. (In Russ.).
41. Sordillo G., Cassaro F. *Process for Production Ferrochrome Alloys with High Nitrogen Content and Low Carbon Content*. Pat. 3595709 US. Publ. 27.07.1971.
42. Wiester H.-J., Vogels H.A., Ulmer H. Stickstoff als Legierungselement in Mangan–Vanadin – Baustählen aus dem Siemens – Martin – Ofen. *Stahl und Eisen*. 1959, Bd. 79, no. 16, S. 1120–1129. (In Germ.).
43. Gol'dshtein M.I., Grin' A.V., Blyum E.E., Panfilova L.M. *Uprochnenie konstruktsionnykh staley nitridami* [Hardening Construction Steels by Nitrides]. Moscow: Metallurgiya, 1970, 224 p.
44. Tanczyn H. *Production of High Nitrogen Manganese Alloy*. Pat. 2696433 US. Publ. 07.12.1954.
45. Wanamaker E.M., Forbes D.D. *Method for Continuously Producing Thermally Stable Nitrided Manganese*. Pat. 2860080 US. Publ. 11.11.1958.
46. Perepelkin V.P., Bogolyubov V.A. High-nitrogen doping alloys. *Stal'*. 1960, no. 9, pp. 813–816. (In Russ.).
47. Perepelkin V.P., Matyushenko N.K., Zel'din V.S., Protsenko I.G. Production of nitrided manganese at the Zaporozhye Ferroalloy Plant. *Stal'*. 1971, no. 7, p. 616. (In Russ.).
48. Madsen S.W., Payer E.L. *Nitrogen-containing Alloy and its Preparation*. Pat. 3304175 USA. Publ. 14.02.1967.
49. Downing G.H., Merkert R.F. *Vanadium-containing Addition Agent and its Process for Producing Same*. Pat. 3334992 USA. Publ. 8.08.1967.
50. Fichte R., Franke H., Reteistorf H.G. *Gesinterte stickstoffhaltige Vorlegierungen für das Legieren von Stähle*. Pat. 1558500 Germany. Publ. 01.07.1971. (In Germ.).

51. Pin'es P., Zezulova Z. Alloying of steel with nitrogen using organic substances. *Stal'*. 1959, no. 7, pp. 625–626. (In Russ.).
52. Franke H., Fuchs A. Stickstoffhaltige geschmolzene Legierungen und Sinter Produkte. *Nene Hutte*. 1966, no. 10, S. 604–606. (In Germ.).
53. Pant P., Dahlmann P., Schlump W., Stein G. A new nitrogen alloying technique – a way to distinctly improve the properties of austenitic steel. *Steel Research*. 1987, no. 1, pp. 18–25.
54. Senichev G.S., Takhautdinov R.S., Bodyaev Yu.A. etc. Improving the technology of smelting transformer steel in the BOF shop of OJSC MMK. *Stal'*. 2006, no. 3, pp. 17–22. (In Russ.).
55. Ziatdinov M.Kh., Maksimov J.M., Kolmakov A.D., etc. *Production of Metallic Composition*. Pat. 2080785 GB. Int. cl. C22C 1/04. B22F 3/12. Publ. 24.04.1985.
56. Ziatdinov M.Kh., Shatokhin I.M. Self-propagating high-temperature synthesis of ferrosilicon nitride. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 1, pp. 39–44.
57. Ziatdinov M.Kh., Shatokhin I.M. Experience in the development, production, and use of self-propagating high-temperature synthesis materials in metallurgy. *Metallurgist*. 2008, vol. 52, no. 11–12, pp. 705–713.
58. Ziatdinov M.Kh., Shatokhin I.M. Self-propagating high-temperature synthesis of ferrochromium nitride. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. 9, pp. 789–794.
59. Ziatdinov M.Kh., Shatokhin I.M. Self-propagating high-temperature synthesis of ferrovanadium nitride for use in smelting high-strength low-alloy steels. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. 11, pp. 1005–1011.
60. Ziatdinov M.Kh. Chromium combustion in a coflow nitrogen. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2016, vol. 52, no. 4, pp. 462–469.
61. Ziatdinov M.Kh., Shatokhin I.M., Leont'ev L.I. SHS Technology of composition ferroalloys. Part I. Metallurgical SHS process. Synthesis of ferrovanadium and ferrochromium nitrides. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 5, pp. 339–347. (In Russ.).
62. Ziatdinov M.Kh., Shatokhin I.M., Leont'ev L.I. SHS Technology of composition ferroalloys. Part II. Synthesis of ferrosilicon nitride and ferrotitanium boride. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 7, pp. 527–535. (In Russ.).
63. Ziatdinov M.Kh. Metallurgical SHS processes as a route to industrial-scale implementation: An autoreview. *Int. Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 2018, vol. 27, no. 1, pp. 1–13.
64. Shatokhin I.M., Ziatdinov M.Kh., Manashev I.R., Shiryayev O.P., Kartunov A.D. Self-propagating high-temperature synthesis (SHS) of composite ferroalloys. *CIS Iron and Steel Review*. 2019, vol. 18, pp. 52–57.

Information about the author:

M.Kh. Ziatdinov, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Laboratory of High-Energy Materials (ziatdinovm@mail.ru)

Received September 4, 2020

Revised September 9, 2020

Accepted October 20, 2020

УДК 669.18

КОНТРОЛЬ ОКСИДНЫХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА IF СТАЛИ*

Морозов А.О.^{1,2}, инженер-исследователь лаборатории диагностики материалов
Погодин А.М.^{1,2}, младший научный сотрудник лаборатории диагностики материалов
Комолова О.А.^{1,2}, к.т.н., доцент кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов, старший научный сотрудник лаборатории диагностики материалов (o.a.komolova@gmail.com)
Бикин К.Б.³, ведущий эксперт (kbbikin@severstal.com)
Григорович К.В.^{1,2}, академик РАН, д.т.н., профессор кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов, заведующий лабораторией диагностики материалов

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)
² Институт металлургии и материаловедения имени А.А. Байкова РАН
(119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 49)
³ ПАО «Северсталь»
(162608, Россия, Вологодская обл., Череповец, ул. Мира, 30)

Аннотация. Современные тенденции в автомобилестроении направлены на снижение массы автомобиля и повышение его безопасности. Высокая пластичность IF-BH стали в сочетании с повышенной прочностью позволяет использовать прокат меньшей толщины в конструкции кузова автомобиля. Достижение высоких пластических свойств в IF-BH стали обеспечивается низким содержанием азота и углерода ($C < 40 \text{ ppm}$, $N < 40 \text{ ppm}$) и контролируемым содержанием углерода в твердом растворе. Возникновение большинства дефектов поверхности листа связано с неметаллическими включениями. Присутствие неметаллических включений в готовой продукции нарушает ее однородность, ухудшает поверхностные свойства стали, усталостную прочность и пластические характеристики металла. В результате выполнения работы методами микрорентгеноспектрального и фракционного газового анализа на растровом электронном микроскопе проанализированы образцы металла трех плавок IF-BH стали, отобранные по всей технологической цепочке производства в СП КС ПАО «Северсталь». Количественно определены основные типы оксидных неметаллических включений, находящихся в стали, а также общее содержание кислорода и азота в металле. Показано, что основными типами оксидных неметаллических включений в исследованных пробах металла являются алюминаты, силикаты и шпинель. Установлены два места с возможным вторичным окислением после ввода алюминия. Между пробами наблюдали заметный прирост азота, что свидетельствовало о вторичном окислении металла. При этом возрастало содержание включений алюминатов в металле и снижалось количество включений алюмомагниевого шпинели. Разработана математическая модель и программное обеспечение, описывающее процесс образования и удаления оксидных неметаллических включений. Адекватность программы подтверждена хорошей сходимостью между расчетными и экспериментальными данными по общему содержанию [O] в различных типах оксидов для первой пробы на установке ковш-печь и в слябе.

Ключевые слова: неметаллические включения, математическое моделирование, автолист, производство стали, BH-эффект.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-782-790

ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции в автомобилестроении направлены на снижение массы автомобиля и повышение его безопасности. Эти задачи решаются за счет использования низкоуглеродистых марок стали, таких как IF-BH сталь, из которых методом штамповки и глубокой вытяжки производят детали корпусов автомобилей. Высокая пластичность IF-BH стали в сочетании с повышенной прочностью позволяет использовать прокат меньшей толщины в конструкции кузова автомобиля, что приводит к снижению его массы, сохраняя при этом

высокие прочностные характеристики. Достижение данных свойств в IF-BH стали обеспечивается низким содержанием азота и углерода ($C < 40 \text{ ppm}$, $N < 40 \text{ ppm}$) и контролируемым содержанием углерода в твердом растворе [1 – 6].

Для повышения качества IF-BH стали необходимо контролировать состояние поверхности листового проката. Возникновение большинства дефектов поверхности листа связано с неметаллическими включениями (НВ). По размеру НВ в IF-BH стали можно разделить на микровключения и макровключения. Размер микровключений не превышает 50 мкм. Макровключения, размер которых превышает 50 мкм, распределены неравномерно и их количество гораздо меньше,

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-29-24146 мк.

однако они существенно влияют на качество готового продукта, поскольку усталостное разрушение всегда происходит в окрестности крупных неметаллических включений независимо от их состава [7 – 10].

Присутствие неметаллических включений в готовом металле нарушает его однородность, ухудшает поверхностные свойства стали, усталостную прочность и пластические характеристики металла. Неметаллические включения являются концентраторами напряжения при деформации, прокатке и штамповке стального листа, что в дальнейшем приводит к возникновению поверхностных дефектов [10, 11]. Негативным эффектом повышенного содержания НВ в стальном расплаве так же является «зарастание» сталеразливочных стаканов, которое сильно снижает скорость разливки и ухудшает технологичность производства [12 – 14].

Целью данного исследования является анализ изменения морфологии и содержания оксидных НВ в металле по всей технологической цепочке производства стали типа IF-ВН и разработка математической модели формирования, модифицирования и удаления неметаллических включений.

Методы исследования

Одним из самых распространенных способов количественной оценки содержания НВ в стали является металлографический метод анализа – сравнение размеров и формы найденных в металле неметаллических включений с эталонными шкалами с использованием балльных шкал. Для определения химического состава НВ используют метод микрорентгеноспектрального микроанализа, в котором приготовленный металлографический шлиф помещают в камеру сканирующего электронного микроскопа, где происходит детектирование включения, определение его химического состава и размерных характеристик. Данные методы исследования не дают полную картину о распределении и форме НВ в объеме образца [15 – 18]. Метод электрохимического осаждения (ЭО) дает возможность растворить матрицу металла и выделить неметаллические включения для последующего изучения их на сканирующем электронном микроскопе. Данный метод позволяет исследовать морфологию и форму НВ [15, 19]. Метод фракционного газового анализа (ФГА) дает возможность определить общее содержание кислорода в различных типах оксидных неметаллических включений и их объемную долю, что обеспечивает более полную картину о содержании различных типов НВ в стали [20].

В ходе работы проведен анализ существующей технологии выплавки, внепечной обработки и разливки IF-ВН стали. Для этого отобраны пробы металла по всей технологической цепочке (кислородный конвертер → установка ковш-печь (УКП) → установка вакуумирования стали (УВС) → МНРЗ → сляб). Схема ввода

присадок, технологических режимов и отбора проб металла показана на рис. 1.

На количество, форму, размер, тип оксидных неметаллических включений в стали оказывают влияние различные факторы производства:

- химический состав, окисленность, масса, температура стали и шлака;
- химический и фракционный состав раскислителей, шлакообразующих и легирующих материалов и их режим ввода;
- режим продувки инертным газом;
- технология вакуумирования;
- тип, химический состав, футеровка и т. д.

Современные методы контроля неметаллических включений позволяют получать результаты исследования через значительный временной интервал с момента отбора пробы металла, что не дает возможности оперативно корректировать технологию производства. Использование имитационной математической модели образования, модифицирования, удаления неметаллических включений позволит прогнозировать влияние технологических операций на содержание НВ в стальном расплаве.

На сегодняшний день существуют математические модели, которые достаточно подробно описывают процессы зарождения, роста и удаления неметаллических включений в стальном расплаве [21 – 25]. Однако на данный момент отсутствует интегральная математическая модель, которая имитирует процессы зарождения, модификации, роста и удаления НВ в зависимости от режима ввода присадок и продувки инертным газом.

В данной работе разработано математическое описание процесса образования НВ и их удаления из металла в ковше и создано программное обеспечение.

В зависимости от начальных условий, таких как химический состав, температура, масса металла и присадок, математическая модель позволяет прогнозировать, какой тип оксидных включений и их количество образуется при заданных условиях.

При создании математического описания взаимодействий между кислородом и остальными компонентами металла учитывалось, что:

- химические реакции между компонентами расплава протекают одновременно;
- направление реакций определяет градиент химического потенциала;
- возможно протекание как прямых, так и обратных реакций по следующей схеме:



где a_1, a_2 – исходные компоненты реакции; a_3, a_4 – продукты реакции; l_1, l_2, l_3, l_4 – стехиометрические коэффициенты реакции.

В соответствии с постулатами Л. Онзагера сделано допущение, что скорость реакции пропорциональна

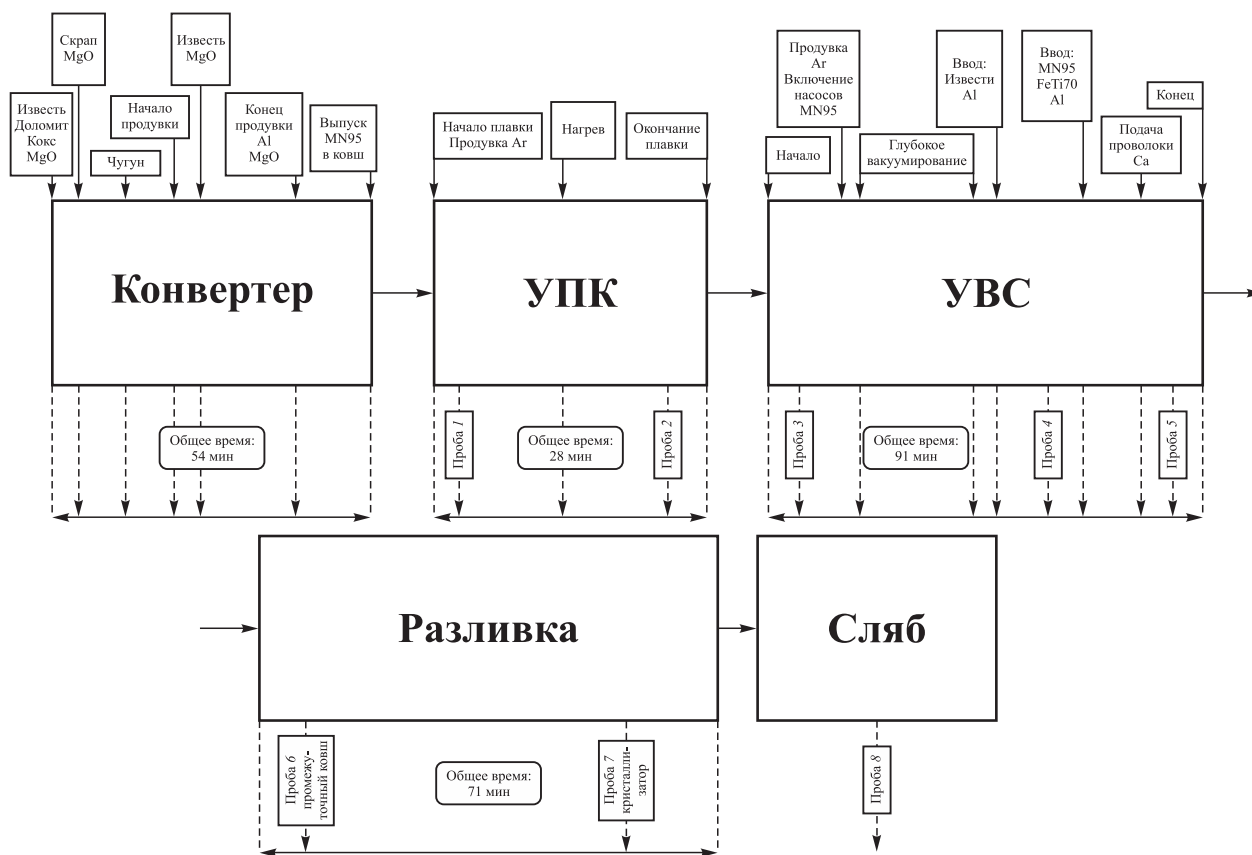


Рис. 1. Схема ввода присадок, технологических режимов и отбора проб металла

Fig. 1. Scheme of additives applying, technological modes and metal sampling

градиенту химического потенциала и рассчитывается по формуле

$$V_i = -S_{\text{пов}} L \text{grad} \mu_i, \quad (1)$$

где V_i – скорость взаимодействия i -го компонента, моль/с; $S_{\text{пов}}$ – поверхность взаимодействия, м^2 ; L – коэффициент Л. Онзагера, $\text{моль}^2/(\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м})$; $\text{grad} \mu_i$ – градиент химического потенциала i -го компонента, $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{м})$.

Поскольку $\text{grad} \mu_i = -\frac{A}{\delta}$, то

$$V_i = S_{\text{пов}} L \frac{A}{\delta} = -S_{\text{пов}} L \frac{RT}{\delta} \ln \frac{K_{\phi}}{K_p} = S_{\text{пов}} L \frac{RT}{\delta} \ln \frac{K_p}{K_{\phi}}, \quad (2)$$

где A – химическое сродство $A = -RT \ln \frac{K_{i, \phi}}{K_{i, p}}$, $\text{Дж}/\text{моль}$;

δ – толщина слоя, м; K_p и K_{ϕ} – равновесная и фактическая константа реакции соответственно.

Скорости реакций характеризуются величиной $\ln \frac{K_p}{K_{\phi}}$. Реакция, которая имеет наибольшее значение $\ln \frac{K_p}{K_{\phi}}$, принимается за базовую. Скорости всех остальных реакций пересчитывают по формуле [26]

$$V_{Me_x O_y} = V_{\text{баз}} \frac{\ln \frac{K_{p(Me_x O_y)}}{K_{\phi(Me_x O_y)}}}{\ln \frac{K_{p, \text{баз}}}{K_{\phi, \text{баз}}}}. \quad (3)$$

После расчета скоростей взаимодействия между компонентами металла происходит пересчет химического состава металла и неметаллических включений. Таким образом, удастся вычислить количество первичных оксидных включений каждого типа.

Для моделирования процессов удаления неметаллических включений при ковшевой обработке стали разработана математическая модель, основанная на вычислении критерия Стокса, характеризующего всплывание НВ в расплаве. В зависимости от величины критерия Стокса делали вывод о возможности удаления НВ из расплава во время донной продувки металла аргоном. После расчета критерия Стокса проводили проверку условия на возможность захвата включения заданного размера пузырьком газа и его переноса в шлаковую фазу. В качестве исходных значений для расчета количества удаленных включений использовали данные по общему содержанию оксидных включений в расплаве, полученные в программе расчета их образования. На выходе из подпрограммы

получали остаточное содержание оксидных включений в жидком металле.

Критерий Стокса, характеризующий отношение величин инерционной силы и вязкого сопротивления среды, рассчитывали по формуле

$$St = \frac{2}{9} \rho_{\text{НВ}} a^2 \frac{u_{\text{пуз}}}{R \mu}, \quad (4)$$

где $\rho_{\text{НВ}}$ – плотность НВ, кг/м³; a – радиус НВ, м; $u_{\text{пуз}}$ – скорость всплывания газового пузырька, м/с; R – радиус всплывающего газового пузырька, м; μ – динамическая вязкость жидкой среды, Па·с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведения работы методами ФГА и микро-рентгеноспектральным анализом НВ на электронном микроскопе были проанализированы образцы проб металла трех плавок IF-ВН стали, отобранные по всей технологической цепочке производства.

От каждой пробы металла подготавливали образцы массой 1,3 – 1,6 г. Анализ образцов металла проводили на газоанализаторе LECO TC600.

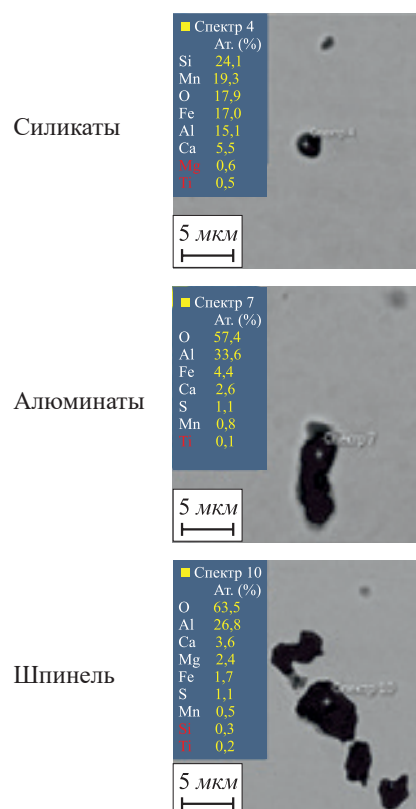
В качестве примера результатов ФГА на рис. 2 представлена типичная кривая газовыделения (эволограма) из образца.

После обработки эволограм ФГА с помощью программного обеспечения OxSePPro были выделены основные типы оксидных НВ. Содержание кислорода в различных типах оксидных НВ, полученное методом ФГА, после пересчета соответствует объемной доле оксидов данного типа в металле. Результаты определения содержания кислорода в различных типах оксидных НВ, общего кислорода и азота в пробах металла, момент ввода основных присадок на различных этапах

производства IF-ВН стали представлены на рис. 3 – 5.

После проведения вакуумной обработки, ввода раскислителей и легирующих, основными типами НВ в расплаве являются алюминаты, в меньшем количестве наблюдается присутствие включений силикатов и шпинели.

С целью подтверждения результатов ФГА методом микро-рентгеноспектрального анализа были проанализированы пробы металла, отобранные от сляба. Результаты анализа неметаллических включений показаны ниже:



На основании этих данных установлено, что основны-

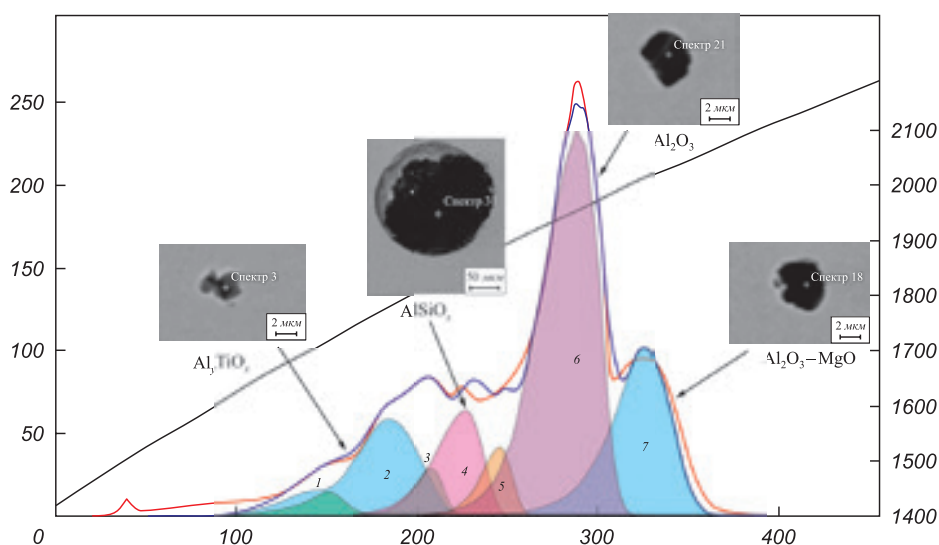


Рис. 2. Результаты определения оксидных неметаллических включений методом ФГА

Fig. 2. Results of determination of oxide non-metallic inclusions by fractional gas analysis

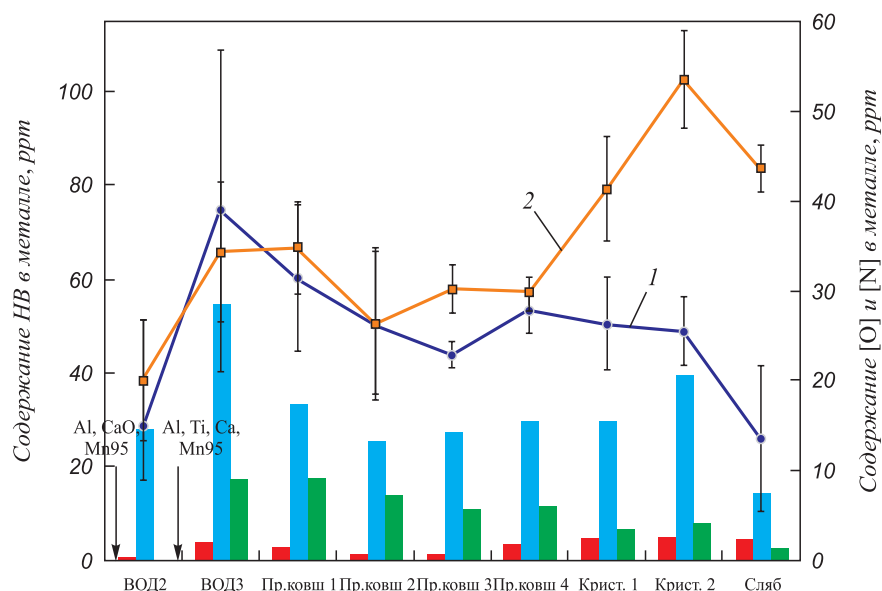


Рис. 3. Результаты ФГА проб металла, отобранных на этапах технологии (плавка 1):
1 – общий кислород; 2 – азот; ■ – силикаты; ■ – алюминаты; ■ – шпинель

Fig. 3. Results of fractional gas analysis of the metal samples taken at the stages of technology (heat 1):
1 – total oxygen; 2 – nitrogen; ■ – silicates; ■ – aluminates; ■ – spinel

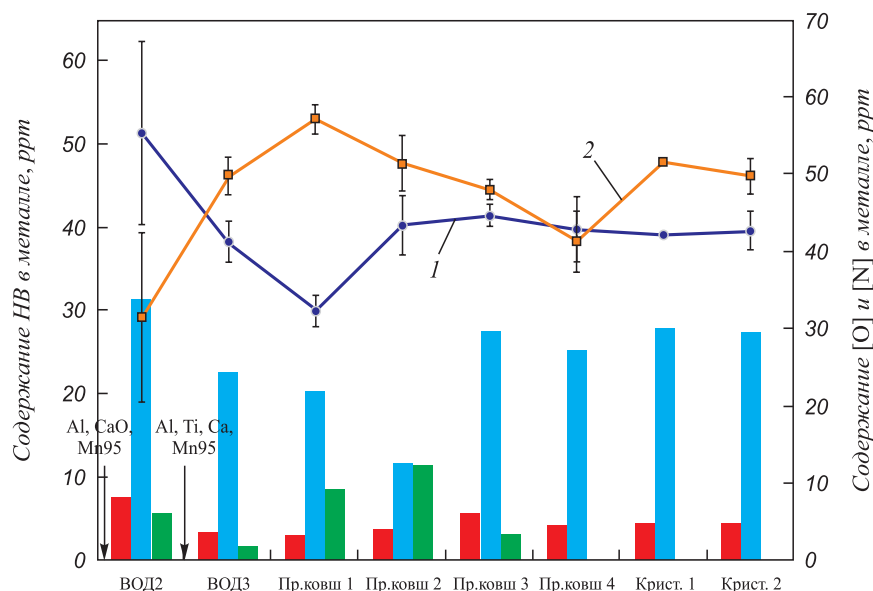


Рис. 4. Результаты ФГА проб металла, отобранных на этапах технологии (плавка 2):
1 – общий кислород; 2 – азот; ■ – силикаты; ■ – алюминаты; ■ – шпинель

Fig. 4. Results of fractional gas analysis of the metal samples taken at the stages of technology (heat 2):
1 – total oxygen; 2 – nitrogen; ■ – silicates; ■ – aluminates; ■ – spinel

ми типами НВ, присутствующими в исследованных пробах металла, являются алюминаты, силикаты и шпинель.

После проведения вакуумной обработки содержание азота в металле находилось в диапазоне 20 – 30 ppm. После ввода материалов на вакууматоре происходило увеличение содержания азота на 10 – 15 ppm. Во время разливки содержание азота в металле промежуточного ковша фактически не изменялось, однако его содержание в пробах металла, отобранных из кристаллизатора,

увеличивалось на 10 ppm, что говорит о возможном вторичном окислении расплава.

Для проверки адекватности разработанного программного обеспечения образования и удаления НВ был проведен сравнительный анализ между результатами расчета и данными ФГА. В качестве исходных параметров для расчета использовали химический состав, температуру, массу, окисленность металла и шлака, массу и химический состав вводимых материалов,

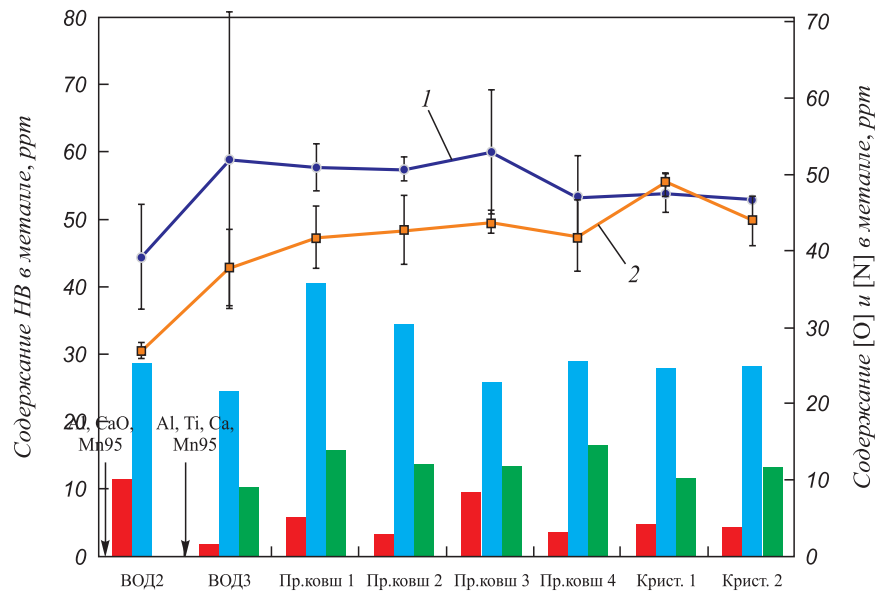


Рис. 5. Результаты ФГА проб металла, отобранных на этапах технологии (плавка 3):
1 – общий кислород; 2 – азот; ■ – силикаты; ■ – алюминаты; ■ – шпинель

Fig. 5. Results of fractional gas analysis of the metal samples taken at the stages of technology (heat 3):
1 – total oxygen; 2 – nitrogen; ■ – silicates; ■ – aluminates; ■ – spinel

режим продувки металла инертным газом. Сравнение результатов ФГА первой пробы металла, отобранной от каждой из трех плавов на У КП, и расчетов с помощью разработанного программного обеспечения образования и удаления НВ показано в табл. 1.

В табл. 2 приведен результат расчета распределения кислорода по типам оксидных неметаллических включений для первой пробы на У КП.

Сравнение результатов ФГА и расчетов содержания НВ в слэбе с помощью разработанного программного обеспечения показано в табл. 3.

В табл. 4 показан результат расчета распределения общего содержания [O] по конкретным типам оксидных включений в слэбе для плавки 1.

Сравнение экспериментальных результатов и дан-

Таблица 1

Сравнение результатов ФГА проб металла и расчета с помощью программы образования НВ для первой пробы на У КП

Table 1. Comparison of the results of fractional gas analysis of the metal samples and calculation according to the program for the formation of non-metallic inclusions for the first metal sample on the LF

Плавка	Общее содержание [O] в оксидах по ФГА, ppm	Общее содержание [O] в оксидах по расчету, ppm
1	678,43 ± 13,01	654,45
2	990,93 ± 77,88	1006,16
3	742,50 ± 36,73	649,19

Таблица 2

Наблюдаемые типы включений и их количество при расчете для первой пробы на У КП

Table 2. Detected types of inclusions and their total content at calculation for the first metal sample on the LF

Плавка	Содержание [O] в разных типах оксидных включений по расчету, ppm
1	FeO = 183,31 MnO = 435,83 SiO ₂ = 30,05
2	FeO = 410,55 MnO = 565,38 SiO ₂ = 30,22
3	FeO = 186,98 MnO = 443,53 SiO ₂ = 23,94

Таблица 3

Сравнение результатов ФГА металла и расчета с помощью программы образования НВ для слэба

Table 3. Comparison of the obtained results of fractional gas analysis and calculations carried out using software for the formation of non-metallic inclusions

Плавка	Общее содержание [O] в оксидах по ФГА, ppm	Общее содержание [O] в оксидах по расчету, ppm
1	17 ± 1	17

Таблица 4

Наблюдаемые типы включений и их количество при расчете для первой пробы на УКП

Table 4. Detected types of inclusions and their total content at calculation for the first metal sample on the LF

Плавка	Содержание [O] в разных типах оксидных включений по расчету, ppm
I	FeO = 0,6
	MnO = 1,5
	SiO ₂ = 6,0
	Al ₂ O ₃ = 5,0
	CaO = 4,5

ных расчетов показали хорошую сходимость по общему содержанию [O] в оксидах для первой пробы на установке ковш-печь и в слябе плавки I.

Выводы

В результате проведенного исследования образцов металла трех плавов IF-ВН стали, отобранных по всей технологической цепочке методами ФГА и микрорентгеноспектрального анализа на растровом электронном микроскопе, количественно определены основные типы включений в стали, а также общее содержание кислорода и азота в металле. Отмечено, что основными типами НВ в исследованных пробах металла являются алюминаты, силикаты и шпинель.

Показана динамика изменения различных типов неметаллических включений в пробах металла на технологических этапах ковшевой обработки и разливки промышленных плавов IF-ВН стали.

Наличие основных типов НВ в пробах, отобранных от сляба, подтверждено методом микрорентгеноспектрального анализа на растровом электронном микроскопе. Установлено, что преобладающим типом неметаллических включений после ввода алюминия на вакууматоре являются включения алюминатов. Причем их содержание в металле практически не уменьшалось на этапах вакууматор – промежуточный ковш – кристаллизатор.

Установлены два места с возможным вторичным окислением после ввода алюминия. Между пробами наблюдали заметный прирост азота, что свидетельствовало о вторичном окислении металла. При этом возросло содержание включений алюминатов в металле и снижалось количество включений алюмомагниевого шпинели.

Разработана математическая модель и программное обеспечение, описывающее процессы образования и удаления оксидных неметаллических включений. Адекватность работы программного обеспечения подтверждена хорошей сходимостью между расчетными и экспериментальными данными по общему содержанию

[O] в различных типах оксидов для первой пробы на установке ковш-печь и в металле сляба.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бхатташария Д. Перспективы развития высокопрочных IF-сталей // Междунар. семинар «Современные достижения в металлургии и технологии производства сталей для автомобильной промышленности», 17 – 18 февр. 2004. – М.: Металлургиздат, 2004. С. 71 – 82
2. Родионова И., Филиппов Г. Технологические аспекты производства сталей для автомобилестроения // Национальная металлургия. 2004. № 2. С. 93 – 97.
3. Титов В. Стальной прокат для автомобильной промышленности // Национальная металлургия. 2004. № 5. С. 84 – 89.
4. Pampa Ghosh, Chiradeep Ghosh, Ray R.K. Precipitation in interstitial free high strength steels // ISIJ International. 2009. Vol. 49. No. 7. P. 1080 – 1086.
5. Горкуша Д.В., Комолова О.А., Григорович К.В. и др. Исследование критериальных параметров достижения ВН эффекта в сверхнизкоуглеродистых сталях для глубокой вытяжки // Изв. вуз. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 3 – 4. С. 201 – 210.
6. Myung-Duk Seo, Jung-Wook Cho, Kwang-Chun Kim, Seon-Hyo Kim. Evolution of non-metallic inclusions in ultra low carbon steel after aluminum deoxidization // ISIJ International. 2014. Vol. 54. No. 3. P. 475 – 481.
7. Зайцев А.И., Родионова И.Г., Хорошилов А.Д. и др. Анализ природы возникновения поверхностных дефектов холоднокатаного проката из IF-сталей // Электрометаллургия. 2012. № 7. С. 36 – 40.
8. Zhou Xiaolei, Shi Zhe, Zhang Guifang. The evolution of non-metallic inclusions in IF steel // Applied Mechanics and Materials. 2015. Vol. 696. P. 62 – 65.
9. Shiozawa K., Lu L. Effect of non-metallic inclusion size and residual stresses on gigacycle fatigue properties in high strength steel // Advanced Materials Research. 2008. Vol. 44 – 46. P. 33 – 42.
10. Bate P.S. Texture development in the cold rolling of IF steel // Materials Science and Engineering: A. 2004. Vol. 38. No. 1. P. 365 – 377.
11. Jin Ma, Bo Zhang, Daokui Xu etc. Effects of inclusion and loading direction on the fatigue behavior of hot rolled low carbon steel // Int. Journal of Fatigue. 2010. Vol. 32. P. 1116 – 1125.
12. Jouni Ikäheimonen, Kauko Leiviskä, Jari Ruuska, Jarkko Matkala. Nozzle clogging prediction in continuous casting of steel // 15th Triennial World Congress, July 21 – 26, 2002, Barcelona, Spain. P. 143 – 147.
13. Tehovnik F., Burja J., Arh B., Knap M. Submerged entry nozzle clogging during continuous casting of al-killed steel // Metalurgija. 2015. Vol. 54. No. 2. P. 371 – 374.
14. Щукина Л.И., Туваев В.Ф., Комолова О.А., Григорович К.В. Исследование причин пониженной разливаемости листовой стали на отечественных предприятиях // Сб. тр. XV Междунар. конгресса сталеплавателей, к 100-летию Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» и 380-летию российской металлургии. 2018. С. 357 – 362.
15. Karasev A.V., Suito H. Analysis of size distributions of primary oxide inclusions in Fe-10 mass pct Ni-M (M = Si, Ti, Al, Zr, and Ce) alloy // Metallurgical and Materials Transactions B. 1999. Vol. 30. No. 2. P. 259 – 270.
16. Ohta H., Suito H. Characteristics of particle size distribution of deoxidation products with Mg, Zr, Al, Ca, Si/Mn and Mg/Al in Fe10 mass % Ni alloy // ISIJ International. 2006. Vol. 46. No. 1. P. 14 – 21.
17. Kanbe Y., Karasev A., Todoroki H., Jönsson P.G. Application of extreme value analysis for two- and three-dimensional determinations of the largest inclusion in metal samples // ISIJ International. 2011. Vol. 51. No. 4. P. 593 – 602.

18. Manish Marotrao Pande, Muxing Guo. Determination of steel cleanliness in ultra low carbon steel by pulse discrimination analysis optical emission spectroscopy technique // *ISI International*. 2011. Vol. 51. No. 11. P. 1778 – 1787.
19. Горкуша Д.В., Григорович К.В., Карасев А.В., Комолова О.А. Изменение содержания различных типов неметаллических включений в процессе внепечной обработки низкоуглеродистой стали класса IF // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 5. С. 345 – 352.
20. Komolova O.A., Grigorovich K.V. Mathematical models, algorithms and software for dynamic simulation of ladle treatment technology // *Metallurgia Italiana*. 2019. No. 3. P. 20 – 24.
21. Mapelli C., Barella S., Gruttaduria A., Mombelli D. Prevision of inclusion content in structural steel // 5th Int. Congress on the Science and Technology of Steelmaking 2012, Dresden, Germany. 2012. P. 1 – 9.
22. Seshadri V., Antônio da Silva C., Alves da Silva I. A physical modeling study of inclusion removal in tundish using inert gas curtain // *Tecnologia. Metallurgia, Materiais Mineracao*. 2012. Vol. 9. No. 1. P. 22 – 29.
23. Zhang L., Thomas B.G., Wang X., Cai K. Evaluation and control of steel cleanliness – review // 85th Steelmaking Conference Proceedings, ISS-AIME, Warrendale, PA, 2002. P. 431 – 452.
24. Lifeng Zhang. Fluid flow and inclusion removal in molten steel continuous casting strands // 5th Int. Conference on CFD in the Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia 13 – 15 December, 2006. P. 1 – 9.
25. Pérez J. Inclusion control model in ladle metallurgy furnace // McMaster University, Master's thesis, Ontario, 2012. P. 131.
26. Grigorovich K.V., Komolova O.A. Mathematical modeling and optimization of steelmaking technologies // Proceedings of the 7th Int. Congress on the Science and Technology of Steelmaking (ICS2018). June 13 – 15, 2018, Venice, Italy.

Поступила в редакцию 15 октября 2020 г.

После доработки 15 октября 2020 г.

Принята к публикации 20 октября 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 10, pp. 782–790.

CONTROL OF OXIDE NON-METALLIC INCLUSIONS IN PRODUCTION OF IF STEEL

A.O. Morozov^{1,2}, A.M. Pogodin^{1,2}, O.A. Komolova^{1,2},
K.B. Bikin³, K.V. Grigorovich^{1,2}

¹ National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS),
Moscow, Russia

² Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS, Moscow,
Russia

³ JSC “Severstal”, Cherepovets, Vologda Region, Russia

Abstract. Modern trends in the automotive industry are aimed at reducing vehicle weight and increasing its safety. The high ductility of IF-BH steel in combination with increased strength allows the use of thinner rolled products in the car body structure. Achievement of high plastic properties in IF-BH steel is ensured by the low content of nitrogen and carbon (C <40 ppm, N <40 ppm) and controlled carbon content in the solid solution. The majority of sheet surface defects are associated with non-metallic inclusions. The presence of non-metallic inclusions in the finished product violates its homogeneity, deteriorates the surface properties of steel, fatigue strength and plastic characteristics of the metal. As a result of the work performed by the methods of fractional gas and micro-X-ray spectral analysis on a scanning electron microscope, metal samples of three IF-BH steel melts were analyzed, taken along the entire process chain of production. The main types of oxide non-metallic inclusions in the steel were quantitatively determined, as well as the total oxygen and nitrogen content in the metal. It is shown that the main types of oxide non-metallic inclusions in the investigated metal samples are aluminates, silicates and spinel. An increase in nitrogen content in the metal after breakdown of the vacuum on the VD was established, which indicates secondary oxidation of the metal. In metal of the samples in the section between the tundish and the crystallizer, nitrogen content in the metal increases which indicates the secondary metal oxidation. At the same time, the content of inclusions of aluminates in the metal increased and the number of inclusions of aluminum-magnesium spinel decreased. A mathematical model and software have been developed that describe the formation and removal of oxide nonmetallic inclusions. Adequacy of the program was confirmed by good convergence between the calculated and laboratory data on the total content [O] in various types of oxides for the first sample at the ladle-furnace unit and in the slab.

Keywords: non-metallic inclusions, mathematical modeling, auto sheet, steel production, BH effect.

REFERENCES

1. Bkhattachariya D. Prospects for the development of high-strength IF-steels. In: *Mezhdunarodnyi seminar “Sovremennye dostizheniya v metallurgii i tekhnologii proizvodstva staley dlya avtomobil’noi promyshlennosti”*, 17 – 18 fevralya 2004 [Int. Seminar “Modern developments in metallurgy and technologies of steels for automotive industry”, 17 – 18 February, 2004]. Moscow: Metallurgizdat, 2004, pp. 71–82. (In Russ.).
2. Rodionova I., Filippov G. Technological aspects of the production of steel for automotive industry. *Natsional’naya metallurgiya*. 2004, no. 2, pp. 93–97. (In Russ.).
3. Titov V. Rolled steel for automotive industry. *Natsional’naya metallurgiya*. 2004, no. 5, pp. 84–89. (In Russ.).
4. Pampa Ghosh, Chiradeep Ghosh, Ray R.K. Precipitation in interstitial free high strength steels. *ISI International*. 2009, vol. 49, no. 7, pp. 1080–1086.
5. Gorkusha D.V., Komolova O.A., Grigorovich K.V., Alpatov A.V., Arsenkin A.M. Criteria for achieving the BH effect in ultra-low carbon steels for deep drawing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 3-4, pp. 201–210. (In Russ.).
6. Myung-Duk Seo, Jung-Wook Cho, Kwang-Chun Kim, Seon-Hyo Kim. Evolution of non-metallic inclusions in ultra low carbon steel after aluminum deoxidization. *ISI International*. 2014, vol. 54, no. 3, pp. 475–481.
7. Zaitsev A.I., Rodionova I.G., Khoroshilov A.D., Mezin F.I., Semernin G.V., Mishnev P.A., Zhironkin M.V., Bikin K.B. Analysis of surface defects occurrence in cold-rolled products from IF-steels. *Elektrometallurgiya*. 2012, no. 7, pp. 36–40. (In Russ.).
8. Zhou Xiaolei, Shi Zhe, Zhang Guifang. The evolution of non-metallic inclusions in IF steel. *Applied Mechanics and Materials*. 2015, vol. 696, pp. 62–65.
9. Shiozawa K, Lu L. Effect of non-metallic inclusion size and residual stresses on gigacycle fatigue properties in high strength steel. *Advanced Materials Research*. 2008, vol. 44–46, pp. 33–42.
10. Bate P.S. Texture development in the cold rolling of IF steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2004, vol. 38, no. 1, pp. 365–377.
11. Jin Ma, Bo Zhang, Daokui Xu, En-Hou Han, Wei Ke. Effects of inclusion and loading direction on the fatigue behavior of hot rolled low carbon steel. *Int. Journal of Fatigue*. 2010, vol. 32, pp. 1116–1125.
12. Jouni Ikäheimonen, Kauko Leiviskä, Jari Ruuska, Jarkko Matkala. Nozzle clogging prediction in continuous casting of steel. In: 15th

- Triennial World Congress, July 21 – 26, 2002, Barcelona, Spain*, pp. 143–147.
13. Tehovnik F., Burja J., Arh B., Knap M. Submerged entry nozzle clogging during continuous casting of al-killed steel. *Metallurgija*. 2015, vol. 54, no. 2, pp. 371–374.
 14. Shchukina L.I., Tuvaev V.F., Komolova O.A., Grigorovich K.V. Investigation of the causes of reduced spillability of sheet steel at domestic enterprises. In: *Sbornik trudov: XV Mezhdunarodnyi kongress staleplavil'shchikov* [Proceedings of XV Int. Congress of Steelmakers]. 2018, pp. 357–362. (In Russ.).
 15. Karasev A.V., Suito H. Analysis of size distributions of primary oxide inclusions in Fe-10 mass pct Ni-M (M = Si, Ti, Al, Zr, and Ce) alloy. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 1999, vol. 30, no. 2, pp. 259–270.
 16. Ohta H., Suito H. Characteristics of particle size distribution of deoxidation products with Mg, Zr, Al, Ca, Si/Mn and Mg/Al in Fe10 mass % Ni alloy. *ISIJ International*. 2006, vol. 46, no. 1, pp. 14–21.
 17. Kanbe Y., Karasev A., Todoroki H., Jönsson P.G. Application of extreme value analysis for two- and three-dimensional determinations of the largest inclusion in metal samples. *ISIJ International*. 2011, vol. 51, no. 4, pp. 593–602.
 18. Manish Marotrao Pande, Muxing Guo. Determination of steel cleanliness in ultra low carbon steel by pulse discrimination analysis optical emission spectroscopy technique. *ISIJ International*. 2011, vol. 51, no. 11, pp. 1778–1787.
 19. Gorkusha D.V., Grigorovich K.V., Karasev A.V., Komolova O.A. Content modification of different types of non-metallic inclusions during low-carbon IF steel ladle treatment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 5, pp. 345–352. (In Russ.).
 20. Komolova O.A., Grigorovich K.V. Mathematical models, algorithms and software for dynamic simulation of ladle treatment technology. *Metallurgia Italiana*. 2019, no. 3, pp. 20–24
 21. Mapelli C., Barella S., Gruttadauria A., Mombelli D. Prevision of inclusion content in structural steel. In: *5th Int. Congress on the Science and Technology of Steelmaking 2012, Dresden, Germany*. 2012, pp. 1–9.
 22. Seshadri V., Antônio da Silva C., Alves da Silva I. A physical modelling study of inclusion removal in tundish using inert gas curtain. *Tecnologia. Metalurgia, Materiais e Mineracao*. 2012, vol. 9, no. 1, pp. 22–29
 23. Zhang L., Thomas B.G., Wang X., Cai K. Evaluation and control of steel cleanliness – review. In: *85th Steelmaking Conference Proceedings, ISS-AIME, Warrendale, PA*, 2002, pp. 431–452.
 24. Lifeng Zhang. Fluid flow and inclusion removal in molten steel continuous casting strands. In: *5th Int. Conference on CFD in the Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia*, 2006, pp. 1–9.
 25. Pérez J. *Inclusion Control Model in Ladle Metallurgy Furnace: McMaster University, Master's thesis, Ontario*, 2012, p. 131.
 26. Grigorovich K.V., Komolova O.A. Mathematical modeling and optimization of steelmaking technologies. In: *Proceedings of the 7th Int. Congress on the Science and Technology of Steelmaking (ICS2018), 2018, Venice, Italy*.
- Funding.** The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 18-29-24146 mk.
- Information about the authors:**
- A.O. Morozov**, Research Engineer of the Laboratory of Materials Diagnostics
- A.M. Pogodin**, Junior Researcher of the Laboratory of Materials Diagnostics
- O.A. Komolova**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection, Senior Researcher of the Laboratory of Materials Diagnostics (o.a.komolova@gmail.com)
- K.B. Bikin**, Leading Expert (kbbikin@severstal.com)
- K.V. Grigorovich**, Academician, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection, Head of the Laboratory of Materials Diagnostics
- Received October 15, 2020
Revised October 15, 2020
Accepted October 20, 2020

УДК 669.15-198

РАЗРАБОТКА СОСТАВА И ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ*

Жучков В.И., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник
Заякин О.В., д.т.н., главный научный сотрудник (zferro@mail.ru)

Институт металлургии УрО РАН
(620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

Аннотация. Основным видом продукции ферросплавных заводов являются стандартные ферросплавы, которые часто не обладают всеми необходимыми служебными характеристиками и малопригодны для обработки металла в ковше, а развивающаяся прогрессивная технология сталеплавильного производства вынуждена приспосабливаться к существующему сортаменту ферросплавов, стандарты на которые не обновлялись 50 и более лет. Кроме того, за последние годы поменялись источники и рынки ферросплавного сырья, снизились его качество и содержание ведущих элементов, что затрудняет или исключает возможность получения ферросплавов по существующим стандартам. В связи с этим требуется выпуск более эффективных ферросплавов нового поколения, пригодных для прогрессивных процессов развивающихся областей черной и цветной металлургии и выплавляемых из нетрадиционных видов отечественного рудного сырья. К ним, в первую очередь, относятся так называемые комплексные или многокомпонентные ферросплавы, содержащие, кроме железа, два и более функциональных элемента. Комплексные ферросплавы следует создавать в наиболее благоприятных сочетаниях компонентов, способствующих необходимому эффективному воздействию на железоуглеродистый расплав при высокой степени усвоения в нем полезных элементов. Для этого разработан комплексный подход к изучению физико-химических характеристик сплавов, ответственных за усвоение элементов в жидком металле и его качество. Создание научных основ формирования новых композиций многокомпонентных ферросплавов, обладающих высокими потребительскими свойствами, и исследование физико-химических процессов получения этих сплавов из нетрадиционного рудного сырья способствуют решению задач по разработке составов эффективных ферросплавов нового поколения и расширению рудной базы ферросплавного производства. При использовании разработанного метода конструирования состава комплексных ферросплавов с применением нетрадиционного сырья были разработаны технологии плавки, получены и применены в лабораторных и промышленных масштабах различные сплавы систем: Fe–Si–Cr; Fe–Si–B; Fe–Si–Ba–Ca; Fe–Si–Al–Nb; Fe–Si–Ca–Mg; Fe–Si–V–Ca–Mn; Fe–Si–Al.

Ключевые слова: металлургия, руда, комплексный ферросплав, шлак, кремний, хром, физико-химические свойства, сталь.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-791-795

Ферросплавы являются полупродуктом, применяемым при выплавке стали, чугуна и цветных металлов для их легирования, модифицирования, рафинирования. Объемы выплавки товарной продукции определяют масштабы производства ферросплавов [1 – 4]. В последние десятилетия в мире и РФ произошли коренные изменения как в технологии получения стали, так и в ее сортаменте, качественных показателях.

Повышение качества металла всегда являлось важнейшей задачей мировой металлургии. Особую значимость вопросы улучшения качества приобрели в последние годы. Появились новые, не имевшиеся ранее требования к качеству стали, причем, как правило, не по одному, а по комплексу свойств металла.

Поскольку основным методом воздействия на свойства стали и чугуна традиционно остается обработка жидкого металла ферросплавами, то ужесточение требований по качеству стали приводит к увеличению выпуска легированных марок, а, следовательно, к повышению удельного расхода ферросплавов [5].

Основным видом продукции ферросплавных заводов являются стандартные ферросплавы, которые часто не обладают всеми необходимыми служебными характеристиками и малопригодны для обработки металла в ковше. В то же время развивающаяся прогрессивная технология сталеплавильного производства вынуждена приспосабливаться к существующему сортаменту ферросплавов, стандарты на которые не обновлялись 50 и более лет. Это ведет к усложнению технологии, снижению производительности сталеплавильного производства и качества продукции.

Кроме того, за последние годы поменялись источники и рынки ферросплавного сырья, снизились его качество и содержание ведущих элементов [6 – 9], что затрудняет или исключает получение ферросплавов по существующим стандартам [10, 11]. В связи с этим требуется выпуск более эффективных ферросплавов нового поколения, пригодных для прогрессивных процессов развивающихся областей черной и цветной металлургии и выплавляемых из нетрадиционных видов отечественного рудного сырья. К ним, в первую очередь, относятся так называемые комплексные или многокомпонентные ферросплавы, содержа-

* Работа выполнена по Государственному заданию ИМЕТ УрО РАН в рамках Программы фундаментальных исследований государственных академий.

шие, кроме железа, два и более функциональных элемента [12, 13].

Комплексные ферросплавы (КФ) следует создавать с наиболее благоприятным сочетанием компонентов, способствующих необходимому эффективному воздействию на железоуглеродистый расплав при высокой степени усвоения в нем полезных элементов [14].

Подбором полезных (целевых) и сопутствующих элементов сплава можно определить его рациональный состав, обеспечивающий высокое и стабильное усвоение элементов, быстрое растворение и равномерное их распределение в объеме железоуглеродистого расплава [15, 16]. Для этого разработан комплексный подход к изучению физико-химических характеристик сплавов, ответственных за усвоение элементов в жидком металле и его качество, включающий определение:

- температур начала и конца плавления;
- плотности ферросплава;
- кинетики его окисления;
- количества и формы образующихся неметаллических включений в обрабатываемом расплаве;
- теплового эффекта взаимодействия КФ с железоуглеродистым расплавом;
- продолжительности плавления ферросплава, его механических и теплотехнических характеристик.

При создании КФ учитывается, что в его составе должны находиться, помимо целевых, еще и элементы, которые благоприятно влияют на служебные характеристики ферросплавов, способствуя повышению усвоения его компонентов сталью. К числу таких элементов относится кремний, наиболее широко используемый в КФ. Достаточно сказать, что кремний входит в состав самого массового в мире ферросплава – ферросиликомарганца [17]. В современных условиях объемы производства ферросиликомарганца составляют около 1/3 всего сортамента ферросплавов [18].

Кремний благотворно влияет на такие важные характеристики ферросплава, как температура плавления, плотность, время плавления в жидком металле.

Химический состав хромосодержащих сплавов*, %

**Chemical composition
of chromium-containing alloys*, wt. %**

Номер сплава	Cr	Fe	Si
1	64,6	34,8	0,5
2	64,8	32,8	5,3
3	57,8	32,1	10,0
4	51,4	29,8	18,7
5	46,2	27,2	26,5
6	41,9	25,7	32,3
7	35,6	22,3	42,0
8	29,2	17,1	53,6

* Содержание углерода ~0,1 %.

Авторами проведены эксперименты по изучению влияния кремния на характеристики сплавов системы Fe–Cr–Si [19]. Химический состав комплексных ферросплавов представлен в таблице (анализы выполнены с использованием оборудования ЦКП «Урал-М», ИМЕТ УрО РАН). Температурные интервалы плавления комплексных ферросплавов определяли методом фиксирования температурных кривых при охлаждении образцов. Изучение плотности проводили пикнометрическим методом в соответствии с ГОСТ 22524-77. Для определения времени плавления сплавов в стали была выбрана математическая модель расчета времени плавления, разработанная учеными УрФУ и ИМЕТ УрО РАН. Модель включает гидродинамическую и тепловую части.

На рис. 1 приведена зависимость величины плотности, температур и времени плавления феррохрома от содержания в нем кремния. Данные рисунка показывают, что кремний оказывает существенное влияние на все приведенные характеристики сплавов. Особенно значительно воздействие кремния в диапазоне до 10 % (температура плавления КФ может снизиться до 200 °С).

Воздействие кремния на свойства ферросплавов можно наблюдать и для других видов сплавов (Fe–Ni–Si, Fe–Nb–Si и др.).

Марганец влияет на температуру плавления в меньшей степени, чем кремний. Так для низкоуглеродистого феррохрома (0,1 % C; 34 – 44 % Cr) увеличение содержания марганца с 12 до 31 % снижает температуру ликвидуса всего на 50 град. (с 1360 до 1310 °С).

Важным преимуществом комплексных ферросплавов является возможность их получения из рудного сырья менее высокого качества, чем для выплавки стандартных сплавов, например из некондиционных материалов, отходов производства, бедных и комплексных руд и концентратов [6, 20, 21]. Это связано с тем, что в составе КФ находятся меньшие концентрации ведущих элементов по сравнению с составом стандартных марок ферросплавов (10 – 40, а не 60 – 90 %).

Благодаря низкой цене нетрадиционного сырья стоимость КФ будет ниже, а из-за возможности его использования появляется новая сырьевая база ферросплавного производства.

Необходимые для выплавки хромовых ферросплавов российские руды имеют низкое содержание хрома (30 – 40 %) и не могут использоваться для получения стандартного феррохрома (~65 % Cr). Проведенные в ИМЕТ УрО РАН исследовательские работы показали, что при замене богатой руды Кемпирсайского месторождения (Казахстан), содержащей 52 % Cr₂O₃, на бедную российскую Сарановского месторождения (38 % Cr₂O₃) технико-экономические показатели процесса плавки ухудшаются. Степень извлечения хрома в сплав снижается почти на 4 % (рис. 2), кратность шлака возрастает с 1,2 до 1,42, при этом остаточное

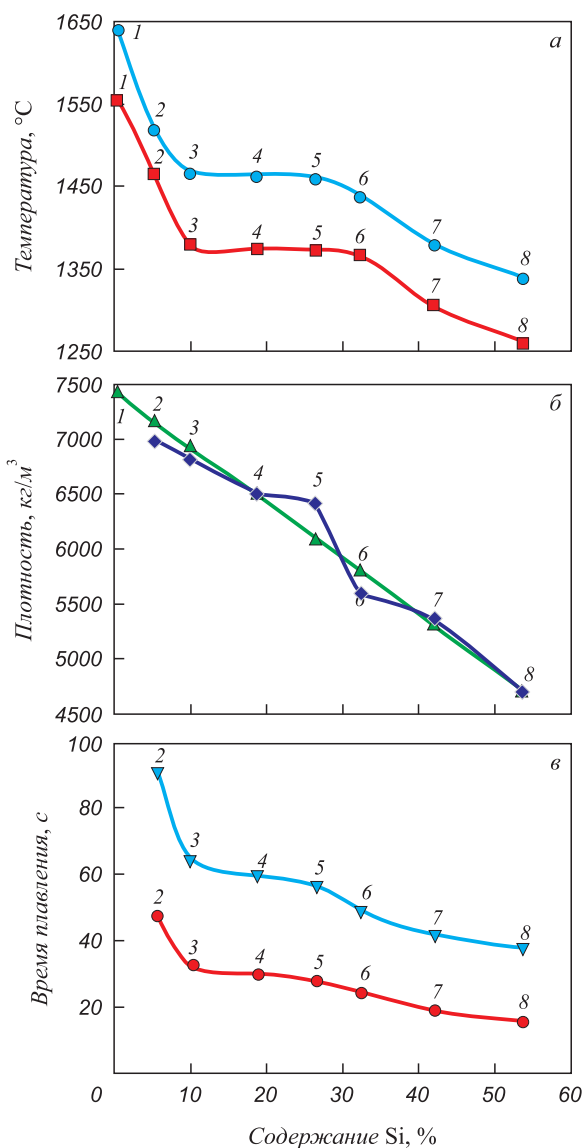


Рис. 1. Зависимость физико-химических характеристик феррохрома от содержания в нем кремния (номера на рисунке соответствуют номерам образцов в таблице):

а – зависимость температурных интервалов плавления (● – значения ликвидус; ■ – значения солидус); б – зависимость величины плотности (◆ – экспериментальные значения, ▲ – расчетные значения); в – зависимость времени плавления ферросплава в железоуглеродистом расплаве (▼ – фракция 50 мм; ● – фракция 30 мм)

Fig. 1. Dependences of the physicochemical characteristics of ferrochrome on the silicon content (the numbers in the figure correspond to the numbers of the samples in the table):

а – dependence of the temperature ranges of melting (● – liquidus, ■ – solidus); б – dependence of density value (◆ – experimental, ▲ – calculated); в – dependence of melting time of the ferroalloy in iron-carbon melt (▼ – fraction 50 mm; ● – fraction 30 mm)

содержание Cr_2O_3 и FeO в нем поднимается (рис. 3). Содержание хрома в сплаве не менее 60 %, отвечающее требованиям большинства отечественных потребителей, обеспечивается при соотношении богатая/бедная руда, равном 35/65. При использовании 100 % Сарановской бедной руды в составе шихты высокоугле-

родистый феррохром содержит 55 – 57 % Cr при повышенном содержании кремния (3 – 10 %), положительно влияющем на служебные характеристики феррохрома.

При увеличении доли руды Сарановского месторождения в шихте изменяется структура стоимости высокоуглеродистого феррохрома. С одной стороны увеличиваются технологические затраты на получение сплава (на 22 % в расчете на единицу хрома) из-за возрастания удельного расхода электроэнергии, снижения степени извлечения хрома в сплав. С другой стороны снижаются затраты на рудную часть шихты, которая составляет 30 – 40 % себестоимости сплава из-за более низкой цены бедного рудного сырья. Суммарный экономический эффект от использования бедного сырья и получения феррохрома с пониженным содержанием хрома и повышенным кремнием выражается в снижении стоимости единицы хрома в сплаве на 20 – 35 % в зависимости от соотношения цен на отечественное и импортное хроморудное сырье.

Выводы. Таким образом, создание научных основ формирования новых композиций многокомпонентных ферросплавов, обладающих высокими потребительскими свойствами, и исследование физико-химических

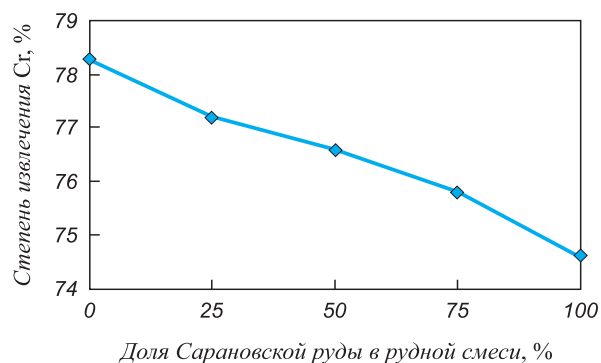


Рис. 2. Изменение степени извлечения хрома в сплав с увеличением доли Сарановской руды в рудной части шихты

Fig. 2. Change in the degree of chromium extraction into the alloy with an increase in quantity of Saranovskaya ore in ore part of the charge

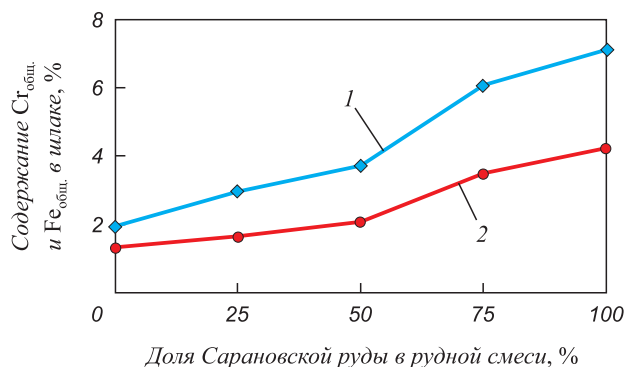


Рис. 3. Изменение содержание $\text{Cr}_{\text{общ.}}$ (1) и $\text{Fe}_{\text{общ.}}$ (2) в шлаке с увеличением доли Сарановской руды в рудной части шихты

Fig. 3. Change in the content of Cr_{total} (1) and Fe_{total} (2) in slag with an increase in quantity of Saranovskaya ore in ore part of the charge

процессов получения этих сплавов из нетрадиционного рудного сырья способствуют решению задач по разработке составов эффективных ферросплавов нового поколения и расширению рудной базы ферросплавного производства за счет вовлечения в технологический процесс новых видов рудного сырья.

Негативной стороной комплексных ферросплавов является утрата их универсализма из-за увеличения в них количества компонентов. В то же время применение КФ позволяет снизить число присаживаемых в расплав стали разных марок ферросплавов.

При использовании разработанного метода конструирования состава КФ с применением нетрадиционного сырья были разработаны технологии плавки, получены и применены в лабораторных и промышленных масштабах различные комплексные ферросплавы систем: Fe–Si–Cr; Fe–Si–B; Fe–Si–Ba–Ca; Fe–Si–Al–Nb; Fe–Si–Ca–Mg; Fe–Si–V–Ca–Mn; Fe–Si–Al. На составы и технологию получения многих сплавов получены российские и международные патенты на изобретения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Holappa L., Louhenkilpi S. On the role of ferroalloys in steelmaking // INFACON: The Efficient Technologies in ferroalloy industry. – Karaganda: “P. Dipner”, 2013. P. 1083 – 1090.
- Pariser H.H., Backeberg N.R., Masson O.C.M., Bedder J.C.M. Changing nickel and chromium stainless steel markets // INFACON XV: Int. Ferro-Alloys Congress, Edited by R.T. Jones & P. den Hoed, 2018. URL: <https://www.pyrometallurgy.co.za/InfaconXV/0001-Pariser.pdf>.
- Cobb H.H. The history of stainless steels // ASM International. 2010. P. 17 – 24.
- Krüger P., Silva C.A., Batista Vieira C. etc. Relevant aspects related to production of iron nickel alloys (pig iron containing nickel) in mini blast furnaces // Proceedings of the 12th Int. Ferroalloy Congress. Helsinki, Finland. Vol. 1. – Outotec Oyj, 2010. P. 671 – 680.
- Рынок ферросплавов в 2017-2018 г.: производство в России // Metal Research. Металлургические исследования. URL: http://www.metalresearch.ru/ferroalloys_market_2017-2018.html.
- Жучков В.И., Леонтьев Л.И., Заякин О.В. Использование российского рудного сырья для производства ферросплавов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2020. № 3 – 4. С. 211 – 217.
- Есенжулов А.Б., Островский Я.И., Афанасьев В.И. и др. Использование российского хроморудного сырья при выплавке высокоуглеродистого феррохрома в ОАО «СЗФ» // Сталь. 2008. № 4. С. 32 – 36.
- Толымбекова Л.Б., Ким А.С., Жунусов А.К., Бабенко А.А. Термические превращения в марганцевых рудах месторождения «Западный Камыс» и шихтах для производства окатышей в неизотермических условиях в потоке воздуха // Металлург. 2012. № 12. С. 47 – 51.
- Гасик М.И., Гладких В.А., Жданов А.В. и др. Расчетное определение ценности марганцеворудного сырья // Электromеталлургия. 2009. № 1. С. 32 – 34.
- Akuov A., Samuratov Ye., Kelamanov B. etc. Development of an alternative technology for the production of refined ferrochrome // Metallurgija. 2020. Vol. 59. No. 4. P. 529 – 532.
- Samuratov Ye., Kelamanov B., Akuov A. etc. Smelting standard grades of manganese ferroalloys from agglomerated thermomagnetic manganese concentrates // Metallurgija. 2020. Vol. 59. No. 1. P. 85 – 88.
- Alex T.C., Godiwalla K.M., Kumar S., Jana R.K. Extraction of silicomanganese from marine and low grade mineral resources // INFACON XI. India, New Delhi. 2007. P. 206 – 214.
- Yessengaliyev D., Baisanov S., Issagulov A. etc. Thermodynamic diagram analysis (TDA) of MnO–CaO–Al₂O₃–SiO₂ and phase composition of slag in refined ferromanganese production // Metallurgija. 2019. Vol. 58. No. 3 – 4. P. 291 – 294.
- Жучков В.И., Заякин О.В., Леонтьев Л.И. и др. Основные направления переработки бедного отечественного хроморудного сырья // Электromеталлургия. 2008. № 5. С. 18 – 21.
- Строганов А.И. Требования к ферросплавам для раскисления и легирования // Производство ферросплавов: Сб. Сибирского металлургического института. – Новокузнецк: Изд. КузПИ, 1980. С. 5 – 24.
- Спанов С.С., Жунусов А.К., Толымбекова Л.Б. Опыт-промышленная выплавка стали с применением ферросиликоалюминия в ТОО «KSP STEEL» // Металлург. 2016. № 11. С. 43 – 47.
- Ringdalen E., Ostrovski O., Gaal S. Ore properties in melting and reduction reactions in silicomanganese production // Proceedings of the 12th Int. Ferroalloy Congress. Helsinki, Finland. Vol. 1. – Outotec Oyj, 2010. P. 487 – 496.
- Боярко Г.Ю., Хатьков В.Ю. Товарные потоки ферросплавов в России // Черные металлы. 2018. № 3. С. 60 – 63.
- Андреев Н.А., Жучков В.И., Заякин О.В. Изучение плотности хромсодержащих ферросплавов // Электromеталлургия. 2012. № 6. С. 15 – 16.
- Zhuniskaliyev T., Nurumgaliyev A., Zayakin O. etc. Investigation and comparison of the softening temperature of manganese ores used for the production of complex ligatures based on Fe–Si–Mn–Al // Metallurgija. 2020. Vol. 59. No. 4. P. 449 – 592.
- Толымбеков М.Ж., Келаманов Б.С., Байсанов А.С., Каскин К.К. Разработка технологии металлургической переработки хромоникелевых руд Казахстана // Сталь. 2008. № 8. С. 52 – 55.

Поступила в редакцию 10 августа 2020 г.

После доработки 12 августа 2020 г.

Принята к публикации 12 августа 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 10, pp. 791–795.

DEVELOPMENT OF COMPOSITION AND PROCESS OF OBTAINING MULTICOMPONENT FERROALLOYS

V.I. Zhuchkov, O.V. Zayakin

Institute of Metallurgy of the UB RAS, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The main product of ferroalloy plants is standard ferroalloys. They often do not have all the necessary service characteristics and are not very suitable for metal processing in a ladle. The developing progressive technology of steelmaking is forced to adapt to the exist-

ing range of ferroalloys, the standards for which have not been updated for 50 years or more. In addition, in recent years, the sources and markets of ferroalloy raw materials have changed, and their quality and content of leading elements have decreased. This makes it difficult or excludes the possibility of obtaining ferroalloys according to existing standards. In this regard, the production of more efficient ferroalloys of a new generation is required, suitable for progressive processes in the developing areas of ferrous and non-ferrous metallurgy

and smelted from non-traditional types of domestic ore raw materials. These include complex or multicomponent ferroalloys containing, in addition to iron, two or more functional elements. Complex ferroalloys should be created in the most favorable combinations of component. It contributes to the necessary effective impact on the iron-carbon melt with a high degree of assimilation of useful elements in it. The creation of scientific foundations for the formation of new compositions of multicomponent ferroalloys with high consumer properties, and the development of physicochemical processes for obtaining these alloys from unconventional ore raw materials contributes to solving the problems of developing compositions of effective new generation ferroalloys and expanding the ore base of ferroalloy production. When using the developed method of designing the composition of complex ferroalloys using unconventional raw materials, melting technologies were developed; various alloys of the systems were obtained and applied on a laboratory and industrial scale: Fe–Si–Cr, Fe–Si–B, Fe–Si–Ba–Ca, Fe–Si–Al–Nb, Fe–Si–Ca–Mg, Fe–Si–V–Ca–Mn, Fe–Si–Al.

Keywords: metallurgy, ore, complex ferroalloy, slag, silicon, chromium, physical and chemical properties, steel.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-791-795

REFERENCES

- Holappa L., Louhenkilpi S. On the role of ferroalloys in steelmaking. *INFACON: The Efficient Technologies in Ferroalloy Industry*. Karaganda: "P. Dipner", 2013, pp. 1083–1090.
- Pariser H.H., Backeberg N.R., Masson O.C.M., Bedder J.C.M. Changing nickel and chromium stainless steel markets. In: *INFACON XV: Int. Ferro-Alloys Congress*. R.T. Jones & P. den Hoed eds. 2018. Available at URL: <https://www.pyrometallurgy.co.za/InfaconXV/0001-Pariser.pdf>.
- Cobb H.H. The history of stainless steels. *ASM International*. 2010, pp. 17–24.
- Krüger P., Silva C.A., Batista Vieira C., Araújo F.G.S., Seshadri V. Relevant aspects related to production of iron nickel alloys (pig iron containing nickel) in mini blast furnaces. *Proceedings of the 12th Int. Ferroalloy Congress, Helsinki, Finland*. Vol. 1. Outotec Oyj, 2010, pp. 671–680.
- Ferroalloy market in 2017–2018: production in Russia. *Metal Research*. Available at URL: http://www.metalresearch.ru/ferroalloys_market_2017-2018.html (In Russ.).
- Zhuchkov V.I., Leont'ev L.I., Zayakin O.V. Application of Russian ore raw materials to ferroalloys production. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 50, no. 3-4, pp. 211–217. (In Russ.).
- Esenzhulov A.B., Ostrovskii Ya. I., Afanas'ev V. I., Zayakin O.V., Zhuchkov V.I. Russian chromium ore in smelting high-carbon ferrochrome at OAO SZF. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 4, pp. 315–317.
- Tolymbekova L.B., Kim A.S., Zhunusov A.K., Babenko A.A. Thermal transformations in manganese ores in the Zapadnyi Kamys deposit and charge materials used to produce in an air flow under nonisothermal conditions. *Metallurgist*. 2013, vol. 56, pp. 919–924.
- Gasik M.I., Gladkikh V.A., Zhdanov A.V. etc. Calculation of the value of manganese ore raw materials. *Elektrometallurgiya*. 2009, no. 8, pp. 756–758.
- Akuov A., Samuratov Ye., Kelamanov B., Zhumagaliyev Y., Taizhigitova M. Development of an alternative technology for the production of refined ferrochrome. *Metallurgija*. 2020, vol. 59, no. 4, pp. 529–532.
- Samuratov Ye., Kelamanov B., Akuov A., Zhumagaliyev Y., Akhmetova M. Smelting standard grades of manganese ferroalloys from agglomerated thermo-magnetic manganese concentrates. *Metallurgija*. 2020, vol. 59, no. 1, pp. 85–88.
- Alex T.C., Godiwalla K.M., Kumar S., Jana R.K. Extraction of silicomanganese from marine and low grade mineral resources. *INFACON XI. India, New Delhi*, 2007, pp. 206–214.
- Yessengaliyev D., Baisanov S., Issagulov A., Baisanov A., Zayakin O., Abdirashit A. Thermodynamic diagram analysis (TDA) of MnO–CaO–Al₂O₃–SiO₂ and phase composition of slag in refined ferromanganese production. *Metallurgija*. 2019, vol. 58, no. 3-4, pp. 291–294.
- Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Leont'ev L.I. etc. Main trends in the processing of poor chrome ore raw materials. *Elektrometallurgiya*. 2008, no. 8, pp. 709–712. (In Russ.).
- Stroganov A.I. Requirements for ferroalloys for deoxidation and alloying. In: *Proizvodstvo ferrosplavov: Sb. Sibirskogo metallurgicheskogo instituta* [Production of ferroalloys: Digest of Siberian Metallurgical Institute]. Novokuznetsk: Izd. KuzPI, 1980, pp. 5–24. (In Russ.).
- Spanov S.S., Zhunusov A.K., Tolymbekova L.B. Pilot plant melting of steel using ferro-silico-aluminum at KSP Steel. *Metallurgist*. 2017, vol. 60, no. 11-12, pp. 1149–1154.
- Ringdalen E., Ostrovski O., Gaal S. Ore properties in melting and reduction reactions in silicomanganese production. *Proceedings of the 12th Int. Ferroalloy Congress, Helsinki, Finland*. Vol. 1. Outotec Oyj, 2010, pp. 487–496.
- Boyarko G.Yu., Khat'kov V.Yu. Commercial streams of ferroalloys in Russia. *Chernye metally*. 2018, no. 3, pp. 60–63. (In Russ.).
- Andreev N.A., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V. Density of chromium-containing ferroalloys. *Elektrometallurgiya*. 2013, no. 6, pp. 418–419. (In Russ.).
- Zhuniskaliyev T., Nurumgaliyev A., Zayakin O., Mukhambetgaliyev Y., Kuatbay Y., Mukhambetkaliyev A. Investigation and comparison of the softening temperature of manganese ores used for the production of complex ligatures based on Fe–Si–Mn–Al. *Metallurgija*. 2020, vol. 59, no. 4, pp. 449–592.
- Tolymbekov M., Kelamanov B., Baisanov A., Kaskin K. Processing Kazakhstan's chromonickel ore. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 8, pp. 58–55.

Acknowledgements. The work was performed in accordance with the State Order of the IMET UB RAS in the framework of the Program of Fundamental Research of State Academies.

Information about the authors:

V.I. Zhuchkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher

O.V. Zayakin, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher (zferro@mail.ru)

Received August 10, 2020

Revised August 12, 2020

Accepted August 12, 2020

УДК 669.01

РОЛЬ Д.К. ЧЕРНОВА В СОЗДАНИИ И РАЗВИТИИ УЧЕНИЯ О СОВРЕМЕННОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИИ. ЧАСТЬ 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЕ ОТКРЫТИЯ Д.К. ЧЕРНОВА

*Леонтьев Л.И.^{1,2,3}, академик РАН, советник, д.т.н., профессор,
главный научный сотрудник (leo@presidium.ras.ru)*

Цуканов В.В.⁴, д.т.н., начальник лаборатории (mail@crism.ru)

Смирнова Д.Л.⁴, инженер третьей категории

¹ Институт металлургии УрО РАН
(620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

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

³ Президиум РАН
(119071, Россия, Москва, Ленинский пр., 14)

⁴ ЦНИИ КМ «Прометей» имени академика И.В. Горынина НИЦ «Курчатовский институт»
(191015, Россия, Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, 49)

Аннотация. Статья содержит информационный материал о существе открытий, сделанных Д.К. Черновым в области науки о металлах, теории и практики термической обработки, новых видов испытаний и исследований во взаимосвязи с развитием этих областей знания в настоящее время. Значимость новых научных открытий, а Д.К. Чернов был реальным первооткрывателем чрезвычайно важных явлений в области фазовых и структурных превращений, строении отливок, изучении прочности стальных изделий, несомненно, ставит имя Д.К. Чернова на первое место в мировом ряду ученых – металлургов, металлослов. Сделанные им открытия в последующем позволили развить науку о металлах и ее разделы – металлургию, деформируемость стали, теорию фазовых и структурных превращений, испытания и исследование металлов, теорию и технологию термической обработки.

Ключевые слова: Д.К. Чернов, металлы, металлургия, ученые-металлурги, история металлургии, металлословение, металлография, рекристаллизация, дилатометрия, фазовый состав, диаграмма превращения.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-796-801

Имя Дмитрия Константиновича Чернова (1839 – 1921 гг.) широко известно нашим современникам, особенно интересующимся историей науки о металлах, работающим в этой сфере знаний. В 2019 г. исполнилось 180 лет со дня рождения выдающегося ученого, первооткрывателя в создании и развитии учения о современной металлургии и металлословении.

В середине XIX в. в мире начинал происходить переход от бронзовых и чугуновых орудий к стальным кованым орудийным стволам. Это в принципе позволяло увеличить калибр орудий, их дальность и износостойкость. Данный переход наблюдался как для полевых орудий, так и для орудий береговых батарей и корабельных пушек, в том числе для нового класса кораблей – броненосцев.

В России этот процесс становления нового производства был тернистым, трудным и не дающим стабильного положительного результата. Орудия единственного тогда в России Златоустовского завода изготавливались в ограниченных размерах и, говоря современным языком, без строгого научного подхода.

Таким образом, при недостатке собственного опыта, были сделаны попытки заимствования сведений от опытных западных производителей. Наибольшим опытом и освоенным производством в больших масштабах обладало предприятие известного немецкого фабриканта Круппа, но по недоступности его фабрики для посетителей и строгого хранения секретов изготовления, информация по производству была полностью закрыта. На эту, на первый взгляд неразрешимую проблему, обратил внимание Д.К. Чернов, работавший на Обуховском заводе с 1866 г. по приглашению Обухова П.М. Нельзя сказать, что в Российской печати не было трудов наших ученых, посвященных развитию металлургического производства и попыткам получения качественных поковок. Однако эти труды не были систематизированы, отличались эмпирическим стилем изложения без опоры на какие-либо научно обоснованные положения.

История производства качественной стали в России практически начиналась с работ Павла Петровича Аносова [1, 2], которого небезосновательно считают основоположником технологии производства литой

высококачественной стали. Одним из важных открытий в области металлургического производства был изобретенный в 1837 г. передел чугуна в сталь методом скрап-рудного процесса. В качестве флюса применялся доломит ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Была разработана полная технология выплавки стали, включая и скрап-рудный процесс. Велики заслуги П.П. Аносова в создании первоначального учения о производстве стали, он воспитал блестящую плеяду своих учеников, одним из которых был Павел Обухов.

П.М. Обухов в 60-х годах XIX в. совместно с Н.И. Путиловым основал в Санкт-Петербурге крупный артиллерийский завод «Товарищество П.М. Обухова» (1863 г.). С 1864 г. начато производство стальных пушечных стволов.

С увеличением калибра орудия и, соответственно, размеров исходных слитков, обнаруживался большой процент дефектов, при выстрелах вызывающих разрыв стволов (иногда при первом выстреле), что приводило к гибели и увечьям артиллеристов. В результате неудач при изготовлении орудий на Обуховском заводе возникло предложение передать заказы на пушки иностранным заводам, отказавшись от их производства в России.

Работая на заводе около двух лет, Д.К. Чернов изучал причины брака стальных пушек. Производство завода стало практически экспериментальной лабораторией, где он проводил свои наблюдения и опыты.

При этом необходимо отметить, что Д.К. Чернов не имел никаких технических средств для измерения температур и пользовался только цветами каления и наблюдениями над состоянием поверхности закаленной стали. Его наблюдения показали, что низкие механи-

ческие свойства стали связаны с ее структурной крупнозернистостью и по всем признакам объясняются температурным режимом горячей пластической деформации.

Впервые в печати свое мнение по практике производства пушечных стволов Д.К. Чернов изложил в 1868 г. [3]. Он отмечал важное и полезное значение для развития металлургического производства в России трудов А.С. Лаврова и Н.В. Калауцкого 1866 и 1867 гг. издания [4, 5]. Свои критические замечания, предложения и рекомендации на основе собственного опыта Д.К. Чернов изложил в труде «Краткий обзор статей гг. Лаврова и Калауцкого о стали и стальных орудиях и собственные Д.К. Чернова исследования по этому предмету» [3]. Анализ этих трудов одновременно с учетом результатов своих исследований позволил Д.К. Чернову прийти к очень важным и основополагающим выводам по строению литых болванок (термин того времени), газообразованию в них, возможным пустотам, а также к практическим рекомендациям о способах плавки и заливке металла в изложницу (форму).

Анализ строения стальных слитков и открытое новое явление – выделение в них древовидных выделений (дендритов), привели к последующему очень важному выводу о необходимости получения более пластичной и вязкой структуры методомковки.

Важная мысль в этих трудах – исследование влияния производимого нагрева с последующей ковкой на структуру литой стали и на достижение требуемых характеристик. При этом Д.К. Чернов сделал попытку изучить эту взаимосвязь и оценить изменение плотности металла, температурного диапазонаковки и сочетания различных вариантов нагрева и условийковки.



Рис. 1. Развитие пушечного производства на заводе «Товарищество П.М. Обухова»

Fig. 1. Development of gun production at the factory of “P.M. Obukhov Partnership association”



Рис. 2. Изучение причин разрыва пушечных стволов

Fig. 2. Studying the causes of gun barrels rupture

Основные положения по этой работе следующие (трактовка дается современным языком и более кратко):

- ковка изменяет структуру литого металла, повышая его плотность;
- при ковке происходит заварка внутренних дефектов;
- неконтролируемые нагревы уже прокованного металла уничтожают действия ковки (сейчас это надо понимать так, что высокотемпературный нагрев уже прокованного металла приводит к росту зерна и ухудшению излома);
- ковка должна проводиться до бурого цвета металла, так как «фаза перегруппировки» лежит близко к этой температуре.

Д.К. Чернов на основании анализа трудов А.С. Лаврова и Н.В. Калакуцкого отметил: «Наша литература должна гордиться трудами гг. Лаврова и Калакуцкого;

они впервые указали на распределение пустот в литых стальных болванках и зависимость их от обстоятельств плавки и литья, и не их вина, что также пришлось знакомить читателей с большим количеством ошибок в этом деле». В заключении Д.К. Чернов указал, что «до сих пор наши взгляды и предубеждения относительно обработки стали чрезвычайно ложны в своих главных основаниях» [3].

Далее сделаем основной упор на базовые положения учения о стали, развиваемого Д.К. Черновым. Основой многих принципиально новых открытий, сделанных Д.К. Черновым, является установление температурной зависимости нагревов металла (углеродистой стали) на получаемые свойства, в частности, на получение вязкого дисперсного излома разрушенной пробы. Была установлена целая система зависимостей между температурой нагрева Fe–C сплава (в основном с содержанием углерода 0,4 и 0,8 %), характером изменения структуры и видом излома.

Эти наиболее важные открытия (и действительно они были установлены впервые Д.К. Черновым, многократно подтверждены экспериментально и им дано научное объяснение, доступное по тому времени развитию научных знаний) и разработки состоят в следующих положениях:

• **Открытие к 1868 г. критических точек «а» и «б».** Положение точки «а» было определено около 700 °С для железоуглеродистых сплавов (0,4 и 0,8 % С) и трактовалось как температура, при нагреве ниже которой сталь не принимала закалку. В настоящее время это линия PSK на диаграмме Fe–C или критическая точка (линия A_{c1}).

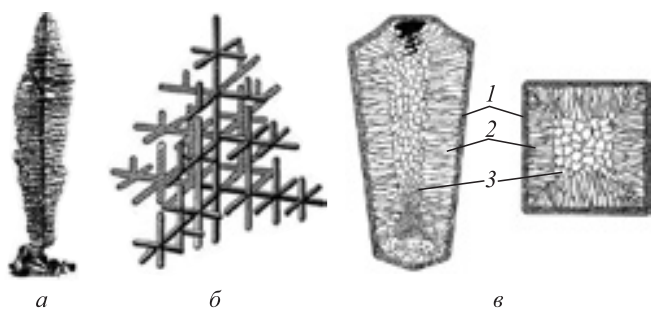


Рис. 3. Кристалл Чернова (а); схема дендрита (б); современное толкование строения слитка (в)

Fig. 3. Chernov's crystal (a); diagram of the dendrite (b); modern interpretation of the ingot structure (c)

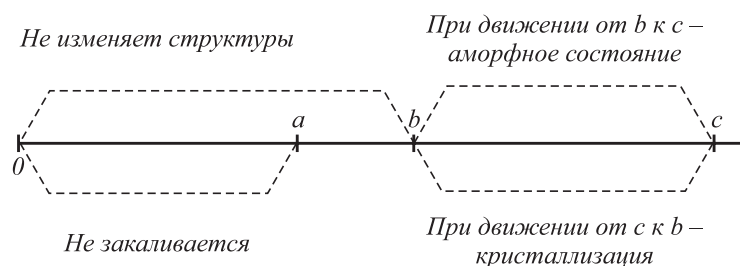


Рис. 4. Схема Д.К. Чернова, представляющая положение критических точек «a», «b» и «c»

Fig. 4. Graph of the position of critical points "a", "b" and "c" defined by D.K. Chernov

Описание этой чрезвычайно важной схемы фазовых превращений (определение на современном языке) дано Д.К. Черновым (рис. 4) и заключается в следующем: точка «0» определяет нулевую точку термометрической шкалы, точка «a» означает темно-вишневое каление, точка «b» – красное неблестящее каление, а точка «c» – температура плавления данной стали. Точки «a», «b», «c» не имеют постоянного места на шкале и изменяются от состава стали (в частности – от содержания углерода). Д.К. Чернов отмечает, что пределы этих перемещений достаточно малы, но, не имея специальных приборов для точного определения температуры, при-

ходило ориентироваться по цвету каления, причем было отмечено, что при малом содержании углерода температура, соответствующая точке «b», резко возросла и ей соответствовало «белое каление».

• **Определение точки «b».** Д.К. Чернов в работе [6] отметил: «Ближайшею причиною такого выделения моей точки «b» из тройной точки Осмонда явилось не мое определение точки «b», а мое обозначение на глаз ее температуры для железа белым калением, тогда как третья волна диаграммы Осмонда для железа заканчивалось около 950 °C, и во всяком случае ниже 1000 °C. Более глубокая причина разногласия лежит, однако, в различии методов или признаков определения критических точек. Что касается моей точки «a», то поставленный мною в основу ее определения признак – минимум температуры, необходимой для получения заковки, совпадает с первой волной (a_1) диаграммы Осмонда, и никаких разногласий здесь нет. По отношению к точке «b» вопрос осложняется, так как моя точка обозначает понятие отвлеченное, теоретическое, практически неуловимое».

Одновременно была предложена схема части диаграммы взаимосвязи положения точек «a» и «b» в зависимости от содержания углерода (рис. 5, фиг. I). Дальнейший вид этой части диаграммы, усовершенствованный Д.К. Черновым к 1916 г., представлен на рис. 5, фиг II. [6].

• **Значение точки «b».** Точка «b» имеет более сложный и многофакторный характер влияния на технологию горячей деформации, термическую обработку, вид получаемого излома и механические свойства. Основные положения следующие [7]:

– сталь, будучи нагрета ниже точки «b», не изменяет своей структуры – медленно или быстро после того она охлаждается... Как только температура стали возвысилась до точки «b», масса стали быстро переходит из зернистого (или вообще говоря, кристаллического) в аморфное (воскообразное состояние (этот переход вполне аналогичен перемене агрегатного состояния) – примечание Д.К. Чернова, 1914 г.);

– чем больше в стали углерода (до 0,8 % C), тем ниже может быть температура нагрева (т. е. температура точки «b» снижается);

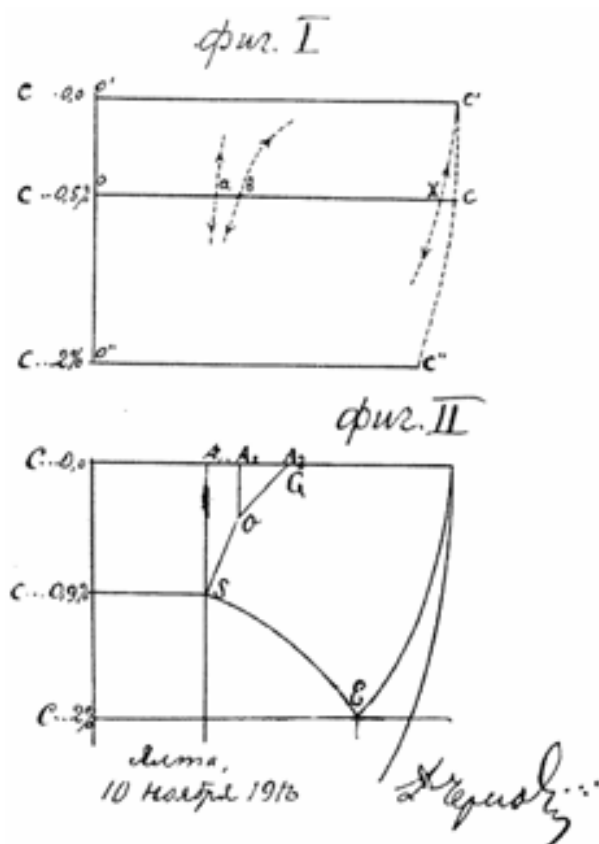


Рис. 5. Диаграммы взаимосвязи положения точек «a» и «b» в зависимости от содержания углерода

Fig. 5. Diagrams of the relationship of "a" and "b" points position depending on carbon content

– подчеркивается целесообразность нагревов «чуть выше» точки «*b*» для получения вязкого состояния при термических нагревах, а такжековки с нагревом выше точки «*b*» для получения вязкого излома и повышения прочности;

– ковка ниже точки «*b*» часто едва ли возможна, но в малых сечениях будет односторонняя вытяжка в длину (для булата возможно, но при нагреве в области точки «*b*» и выше, узора, свойственному булату, не будет);

– лучше всего ковать, нагревая выше точки «*b*», в процессековки опускать температуру в диапазоне точки «*b*» (будет наблюдаться неоднородность структуры), далее нагревать до точки «*b*» и быстро охлаждать за ее пределы с дальнейшим медленным охлаждением в песке или золе. После этого достигается вязкий излом в стали. Итоговый вывод: такой термической обработке необходимо подвергать все крупные стальные изделия (реально – это «изотермический отжиг» в диапазоне $A_{r3} \div A_{r1}$).

Экспериментальный материал, с которым работал Д.К. Чернов – стали с 0,4 и 0,8 % С, определялся тем, что нелегированная сталь с 0,4 % С применялась для изготовления стволов орудий (практически в отоженном состоянии по современной терминологии), а нелегированная сталь с 0,8 % С применялась для изготовления крупных бронебойных снарядов.

В итоге Д.К. Чернов видел перспективу применения своих разработок для совершенствования технологии производства поковок: «Нужно стремиться достигнуть того, чтобы наши орудия были по возможности мелкозернистого сложения; для этого следует, как мы видели,

после нагрева болванки до высокой температуры ковать до тех пор, пока она не остынет до температуры, обозначенной мною точкой «*b*»; тогда вместе с изменением куска в данную форму мы не дадим ему кристаллизаться и по возможности приблизим структуру его к аморфной массе» [8].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аносов П.П. Об опытах закалки стальных вещей в сгущенном воздухе, произведенных в 1828 – 1829 гг. // Горный журнал. 1829. Кн. 10. С. 126 – 131.
2. Аносов П.П. О булатах. Сочинение корпуса горных инженеров г-на Аносова. Часть 1, СПб, 1841. Часть 2, Златоуст, 1841 // Горный журнал. 1841. Кн. 2. С. 157 – 317.
3. Чернов Д.К. Критический обзор статей гг. Лаврова и Калакуцкого о стали и стальных орудиях и собственные Д.К. Чернова исследования по этому же предмету // Записки Императорского Русского Технического Общества. 1868. №7.
4. Лавров А.С. О приготовлении стальных орудий // Артиллерийский журнал. 1866. № 10, 11.
5. Калакуцкий Н.В. Материалы для изучения стальных орудий // Артиллерийский журнал. 1867. № 5, 7, 9, 10.
6. Письмо проф. Д.К. Чернова редактору «Журнала Русского Металлургического Общества» // Журнал Русского Металлургического Общества. 1916. № 3, 4.
7. Доклад Д.К. Чернова на II Всероссийском съезде деятелей по горному делу, металлургии и машиностроению 17 апреля 1913 г.
8. Чернов Д.К. Критический обзор статей Лаврова и Калакуцкого / В кн.: Д.К. Чернов и наука о металлах. – Ленинград; Москва: Металлургиздат, 1950. С. 91.

Поступила в редакцию 17 февраля 2020 г.

После доработки 5 марта 2020 г.

Принята к публикации 18 октября 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 10, pp. 796–801.

D.K. CHERNOV'S ROLE IN CREATING AND DEVELOPING THE DOCTRINE OF MODERN METALLURGY AND METAL SCIENCE. PART 1. D.K. CHERNOV'S MAIN THEORETICAL AND INDUSTRIAL DISCOVERIES

L.I. Leont'ev^{1,2,3}, *V.V. Tsukanov*⁴, *D.L. Smirnova*⁴

¹Institute of Metallurgy UB RAS, Ekaterinburg, Russia

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

³Scientific Council on Metallurgy and Metal Science of Russian Academy of Sciences (Department of Chemistry and Material Sciences), Moscow, Russia

⁴Academician I.V. Gorynin Central Research Institute of Structural Materials "Prometey" National Research Center "Kurchatov Institute", St. Petersburg, Russia

Abstract. The paper contains informational material about the essence of the discoveries made by D.K. Chernov in the field of metal science, theory and practice of heat treatment, new types of tests and investigations. D.K. Chernov was a real pioneer of extremely important phenomena in the field of phase and structural transformations, casting structure, and study of strength of steel products. Significance of his discoveries, undoubtedly, puts D.K. Chernov's name on the first place in a row of world scientists – metallurgists and metal scientists. Later his discoveries allowed one to develop the science of metals and its subdisciplines – metallurgy, steel deformability, theory of phase and

structural transformations, tests and research of metals, theory and technology of heat treatment.

Keywords: D.K. Chernov, metals, metallurgy, metallurgical scientists, history of metallurgy, metal science, metallography, recrystallization, dilatometry, phase composition, transformation diagram.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-796-801

REFERENCES

1. Anosov P.P. The experiments on hardening steel products in condensed air, made in 1828–1829. *Gornyi zhurnal*. 1829, Book 10, pp. 126–131. (In Russ.).
2. Anosov P.P. Bulat. Composition of the corpus of mining engineers. Part 1: St. Petersburg, 1841. Part 2: Zlatoust, 1841. *Gornyi zhurnal*. 1841, Book 2, pp. 157–317. (In Russ.).
3. Chernov D.K. A critical review on articles of Lavrov and Kala-kutskii on steel and steel tools and D. K. Chernov's own research on the same subject. *Zapiski Imperatorskogo Russkogo Tekhnicheskogo Obshchestva*. 1868, no. 7. (In Russ.).
4. Lavrov A.S. Production of steel tools. *Artilleriiskii zhurnal*. 1866, no. 10, 11. (In Russ.).

5. Kalakutskii N.V. Materials for investigation of steel tools. *Artilleriiskii zhurnal*. 1867, no. 5, 7, 9, 10. (In Russ.).
6. Chernov D.K. Letter from Prof. D.K. Chernov to the editor of the Journal of the Russian metallurgical society. *Zhurnal Russkogo Metallurgicheskogo Obshchestva*. 1961, no. 3-4. (In Russ.).
7. *Doklad D.K. Chernova na II Vserossiiskom s"ezde deyatelei po gornomu delu, metallurgii i mashinostroeniyu 17 aprelya 1913 g.* [Report of D.K. Chernov at the II All-Russian Congress of Mining, Metallurgy and Mechanical Engineering on April 17, 1913]. (In Russ.).
8. Chernov D.K. Critical review on articles of Lavrov and Kalakutskii. In: *D.K. Chernov i nauka o metallakh* [D.K. Chernov and Metal Science]. Leningrad; Moscow: Metallurgizdat, 1950, pp. 91. (In Russ.).

Information about the authors:

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

V.V. Tsukanov, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory
(mail@crism.ru)

D.L. Smirnova, Engineer

Received February 17, 2020

Revised March 5, 2020

Accepted October 16, 2020

УДК 621.787.4

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА КАЛИБРОВАННОЙ СТАЛИ ПОВЕРХНОСТНЫМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ. ЧАСТЬ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ОРБИТАЛЬНОМ ПОВЕРХНОСТНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

*Зайдес С.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий
и материалов (zsa@istu.edu)*

*Фам Ван Ань, аспирант кафедры машиностроительных технологий
и материалов (vananhtdh0202@gmail.com)*

Иркутский национальный исследовательский технический университет
(664074, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 83)

Аннотация. Холоднотянутая калиброванная сталь является эффективной заготовкой для изготовления маложестких цилиндрических деталей типа валов и осей. Высокая точность диаметрального размера по длине заготовки, малая шероховатость поверхности, повышенная твердость и прочность поверхностного слоя по сравнению с горячекатаным прокатом позволяют изготавливать разнообразные детали с высоким коэффициентом использования металла и при высокой производительности механической обработки. Основным недостатком калиброванного металла заключается в остаточных напряжениях, которые возникают при обработке давлением. Для их снижения или изменения характера распределения по сечению предлагается использовать малые пластические деформации в поверхностном слое проката. Известные в практике способы поверхностного пластического деформирования (ППД) обычно приводят к искривлению маложестких заготовок. Для интенсификации напряженно-деформированного состояния в очаге деформации предлагается способ орбитального поверхностного деформирования. Схема орбитального деформирования представляет собой стержневой индентор (инструмент), один конец которого снабжен шаровым наконечником, находящийся в контакте с обрабатываемой поверхностью. Второй конец стержневого индентора вращается относительно вертикальной оси, образуя в пространстве коническую поверхность с некоторым углом при вершине. Вдоль оси стержня действует деформирующая сила. На основе конечно-элементного моделирования рассмотрено влияние основных параметров орбитального поверхностного деформирования на напряженное состояние в очаге деформации и остаточные напряжения в готовых изделиях. По сравнению с традиционным процессом ППД интенсивность напряжений при орбитальном поверхностном деформировании возрастает на 10 – 15 %. Остаточные напряжения сжатия, которые формируются в поверхностных слоях, достигают 70 – 85 % предела прочности материала. Установлен относительный радиус орбитального вращения и радиус рабочего инструмента, при которых обеспечивается формирование максимальных временных и остаточных напряжений. При увеличении частоты орбитального вращения рабочего инструмента временные и остаточные напряжения сжатия возрастают. Во второй части статьи предполагается представить информацию о более эффективном способе поверхностного деформирования и изменении начальных остаточных напряжений, которые формируются при калибровке цилиндрических прутков.

Ключевые слова: калиброванная сталь, маложесткие цилиндрические детали, поверхностный слой, интенсивность напряжений, остаточные напряжения, напряженное состояние, орбитальное поверхностное деформирование, кинематика рабочего инструмента, конечно-элементное моделирование.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-802-807

ВВЕДЕНИЕ

Холоднотянутый калиброванный металл по сравнению с горячекатаным обладает рядом бесспорных преимуществ по механическим свойствам, качеству поверхности и точности диаметрального размера [1, 2]. В этой связи калиброванную сталь широко применяют в качестве эффективных заготовок для изготовления разнообразных деталей машин. В машиностроении известен класс маложестких цилиндрических деталей, у которых длина в 20 и более раз превышает их диаметр. К таким деталям относят рабочие и трансмиссионные валы артезианских турбинных насосов, ходовые валики металлорежущих станков, штоки гидроцилиндров,

валы судовых установок и многие другие детали машин. Использование в качестве заготовок калиброванного проката позволяет не только увеличить коэффициент использования конструкционного материала (так как резко снижаются отходы металла в виде стружки), но и существенно повысить производительность технологического процесса за счет сокращения механических операций по удалению «лишнего» металла.

Достаточно широко используют холоднотянутый прокат в качестве заготовок для изготовления деталей на станках-автоматах и автоматических линиях [1]. Высокая диаметральная точность и стабильность размера по длине заготовки обеспечивает ее надежное закрепление в цанговых патронах, а для образования легко

ломающейся стружки, которая необходима для обеспечения устойчивого процесса резания, разработана специальная «автоматная сталь», в состав которой введено небольшое количество свинца [2].

Несмотря на ряд преимуществ, калиброванная сталь имеет существенный недостаток, который в ряде случаев ограничивает сферу ее применения. Таким недостатком является достаточно высокий уровень растягивающих остаточных напряжений, которые являются причиной неравномерности пластических деформаций при обработке металла давлением [3 – 7]. Практически любая механическая или термическая операция вызывает нарушение равновесия остаточных напряжений, что приводит к искажению формы или искривлению цилиндрических заготовок [3, 8]. В ряде случаев неравномерность остаточных напряжений является причиной повреждения или даже разрушения металла. В производственной практике известны случаи образования «крокодиловой пасти» при запрессовке прутков в волоку, формирование сквозных трещин в сортовом прокате, коррозионное разрушение, образование трещин при механической обработке проката на металлорежущих станках [1, 9 – 13].

В связи с изложенными данными возникает задача по изменению остаточных напряжений в холоднотянутом металле. В производственной практике для этого часто используют термические операции. Однако при обработке длинномерных деталей малой жесткости такие технологии требуют специального термического оборудования. Возникают сложности в обеспечении стабильности распределения температуры при нагреве и охлаждении по длине детали. Кроме этого, при термической обработке повреждается поверхность изделий, снижаются механические характеристики прочности, повышается длительность технологического цикла.

Другой возможностью изменения остаточных напряжений являются малые пластические деформации, которые могут как снизить остаточные напряжения растяжения в поверхностных слоях, так и сформировать остаточные напряжения сжатия, оказывающие обычно положительное влияние на эксплуатационные характеристики изделий машиностроения [5, 14 – 17].

В технологии машиностроения среди отделочно-упрочняющих методов обработки широкое распространение на практике получили способы поверхностного пластического деформирования (ППД), обеспечивающие формирование качественного поверхностного слоя с остаточными напряжениями сжатия [18 – 20]. Однако при обработке нежестких деталей традиционные схемы деформирования оказались малоэффективными, так как большие радиальные силы от деформирующих элементов вызывают изгиб заготовок при обработке, что отрицательно влияет как на форму, так и на качество поверхностного слоя деталей машин.

Цель данной работы – разработка эффективного способа поверхностного пластического деформирования

и определение влияния основных параметров процесса на напряженное состояние в очаге деформации и остаточные напряжения в цилиндрических заготовках.

СХЕМА ОРБИТАЛЬНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Для снижения остаточных напряжений растяжения или преобразования их в напряжения сжатия необходимо сформировать определенное поле противоположных по знаку остаточных напряжений. Для этих целей требуется создать достаточно высокую интенсивность напряжений в очаге деформации. Традиционные схемы поверхностного деформирования достигают этого за счет повышения величины натяга, но при этом происходит дополнительное искривление маложесткой детали. Ставится задача повысить интенсивность напряжений в очаге деформации без увеличения величины натяга.

На рис. 1 представлена схема поверхностного пластического деформирования на основе орбитального воздействия деформирующего инструмента, которое осуществляется за счет вращения нагруженного индентора относительно оси, перпендикулярной оси заготовки. При этом траектория вращения осевой линии индентора образует в пространстве коническую поверхность с углом при вершине 2α . Новая кинематика рабочего инструмента обеспечивает повышение интенсивности напряжений в зоне нагружения, так как каждый очаг деформации дополнительно, за счет орбитального движения, нагружается рабочим инструментом по сферической поверхности лунки [21].

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для анализа напряженного состояния в очаге деформации при упрочнении различными способами ППД успешно применяется компьютерное моделирование, в основе которого лежит метод конечных элементов (МКЭ). Одной из универсальных и широко применяемых программ, реализующих МКЭ, является ANSYS [22, 23], которая и была использована в данной работе. Для проведения расчетов при ППД построена геометрическая модель в виде цилиндра и стержня с шаровым наконечником.

Параметры моделирования: коэффициент трения в зоне контакта $f = 0,1$; конечно-элементная форма – гексаэдр, сгущение 6333 элемента, 30 520 узлов.

Принятые допущения:

- заготовку моделировали как упругопластическое, а индентор – как абсолютно жесткое тело;
- тепловые явления при деформировании и микрорельеф поверхности не учитываются.

Базовые режимы обработки, которые использовали при оценке влияния параметров орбитального поверхностного деформирования на напряженное состояние в очаге пластической деформации и компоненты

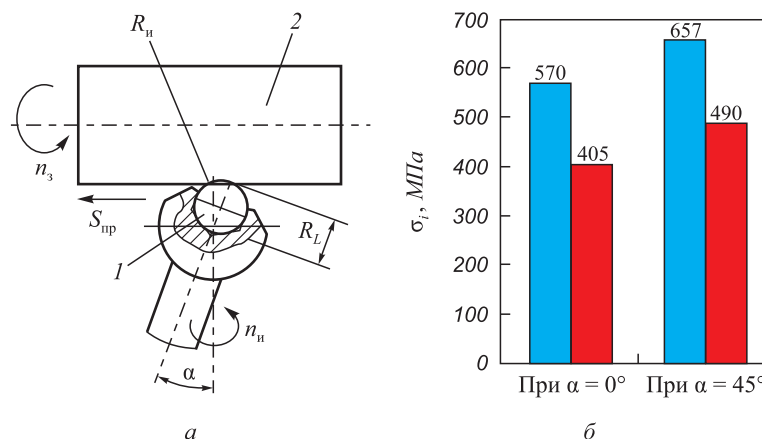


Рис. 1. Схема процесса упрочнения (а) и схема значений интенсивности максимальных напряжений (б) при орбитальном поверхностном деформировании:

1 – рабочий инструмент; 2 – заготовка; n_3 – частота вращения заготовки; α – угол наклона рабочего инструмента; n_i – частота вращения рабочего инструмента; S_{np} – подача инструмента; R_i – радиус инструмента; R_L – радиус орбитального вращения; ■ – максимальные временные напряжения; ■ – максимальные остаточные напряжения сжатия

Fig. 1. Scheme of the hardening process (a) and diagram of the values of maximum stresses intensity (b) during orbital surface deformation 1 – working tool; 2 – workpiece; n_3 – workpiece rotation frequency; α – angle of working tool inclination; n_i – frequency of working tool rotation; S_{np} – tool feed; R_i – radius of the tool; R_L – radius of orbital rotation; ■ – maximum time stresses; ■ – maximum residual compressive stresses

остаточных напряжений в поверхностном слое: частота вращения заготовки $n_3 = 100$ об/мин; угол наклона рабочего инструмента $\alpha = 5^\circ$; частота вращения рабочего инструмента $n_i = 60$ об/мин; величина натяга $t = 0,1$ мм; подача инструмента $S_{np} = 0,11$ мм/об; радиус инструмента $R_i = 4$ мм; радиус орбитального вращения $R_L = 5$ мм.

Напряженное состояние цилиндра в целом оценивали по интенсивности напряжения σ_i , предложенное Мизесом [12]:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{(\sigma_z - \sigma_\phi)^2 + (\sigma_\phi - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2}{2}},$$

где σ_r – радиальные; σ_ϕ – тангенциальные; σ_z – осевые напряжения.

Напряженное состояние материала при деформационном упрочнении можно разделить на временное и остаточное. Первое из них возникает при действии внешних сил, второе – при их отсутствии. Временные напряжения влияют на энергосиловые характеристики процесса, степень и глубину упрочненного слоя, давление в зоне контакта, шероховатость поверхности заготовки, прочность и износостойкость деформирующего инструмента, а остаточные напряжения – на усталостную прочность, процессы разрушения, износостойкость, коррозию и другие эксплуатационные свойства изделий.

ностном деформировании (результаты получены при базовых режимах упрочнения).

Установлено, что в процессе орбитального поверхностного деформирования создаются остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое и остаточные напряжения растяжения в центральной зоне. Максимальные осевые и тангенциальные остаточные напряжения сжатия формируются на поверхности деталей. Величина осевых остаточных напряжений во всех случаях значительно превышает тангенциальные.

Рассмотрим влияние основных параметров орбитального поверхностного деформирования на интенсивность максимальных напряжений.

Влияние угла наклона (α) и глубины внедрения (t) рабочего инструмента. На рис. 3 представлено влия-

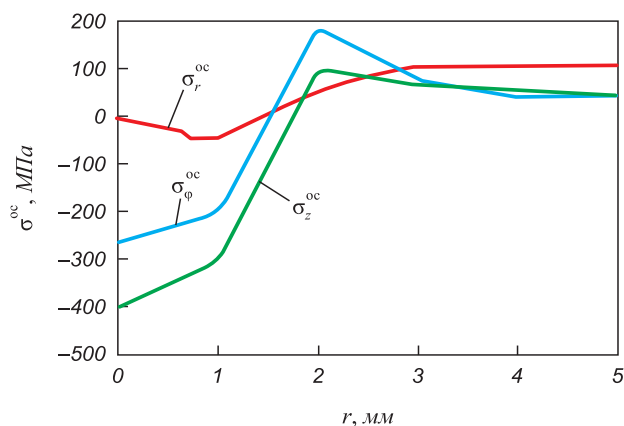


Рис. 2. Распределение компонент остаточных напряжений вдоль радиуса образца

Fig. 2. Distribution of residual stresses components along the sample radius

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 2 приведены компоненты остаточных напряжений вдоль радиуса образца при орбитальном поверх-

ние угла наклона и глубины внедрения рабочего инструмента на интенсивность напряжений. Следует отметить, что существует оптимальное значение угла наклона рабочего инструмента, при котором обеспечивается формирование максимальных временных и остаточных напряжений. В данном случае, с увеличением угла наклона рабочего инструмента от 0 до 60°, максимальные временные и остаточные напряжения сначала возрастают, затем проходят через максимумы ($\alpha = 45^\circ$) и уменьшаются до определенного значения.

С увеличением величины натяга растет интенсивность временных и остаточных напряжений. При величине натяга свыше 0,175 мм происходит перенаклеп, который отрицательно сказывается на качестве и эксплуатационных свойствах деталей машин.

Влияние продольной подачи рабочего инструмента ($S_{пр}$) и частоты вращения заготовки (n_3). На рис. 4 представлено влияние продольной подачи рабочего инструмента и частоты вращения заготовки при орбитальном поверхностном деформировании на интенсивность напряжений.

Результаты моделирования показали, что временные напряжения изменяются незначительно при подаче рабочего инструмента в диапазоне от 0,1 до 0,2 мм, а при больших значениях подачи временные напряжения снижаются более интенсивно. Подача рабочего инстру-

мента при используемых режимах обработки (в данном случае 0,15 – 0,40 мм) практически не влияет на уровень остаточных напряжений. Уменьшение подачи ($S_{пр} < 0,15$ мм) приводит к местному увеличению деформации обкатываемой поверхности и, следовательно, остаточные напряжения увеличиваются.

Анализ результатов моделирования показал, что при орбитальном поверхностном деформировании частота вращения заготовки существенно влияет на интенсивность максимальных временных и остаточных напряжений. Повышение скорости деформации приводит к увеличению сопротивления металлов деформированию, что объясняется возрастанием скорости перемещений дислокаций, вызывающим, в свою очередь, увеличение сопротивления кристаллической решетки этому перемещению.

Влияние марки материалов. Механические характеристики материала влияют на напряженно-деформированное состояние в очаге деформации и на процессы разгрузки при выходе инструмента, а, следовательно, и на остаточные напряжения упрочненных изделий.

Как видно из таблицы, при постоянных режимах упрочнения, чем больше предел текучести, тем большую величину имеет интенсивность напряжений при орбитальном поверхностном деформировании. При

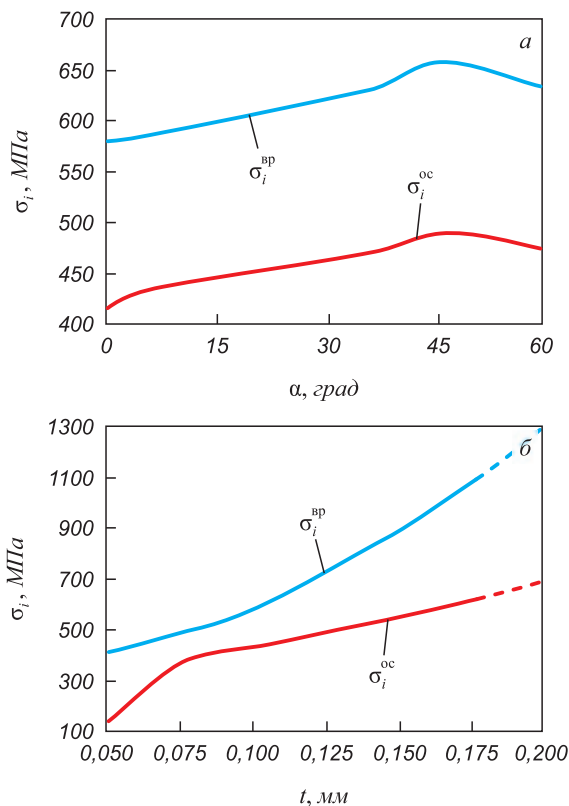


Рис. 3. Зависимость интенсивности максимальных напряжений от угла наклона (а) и глубины внедрения рабочего инструмента (б)

Fig. 3. Dependence of maximum stresses intensity on the angle of inclination (a) and depth of the working tool penetration (b)

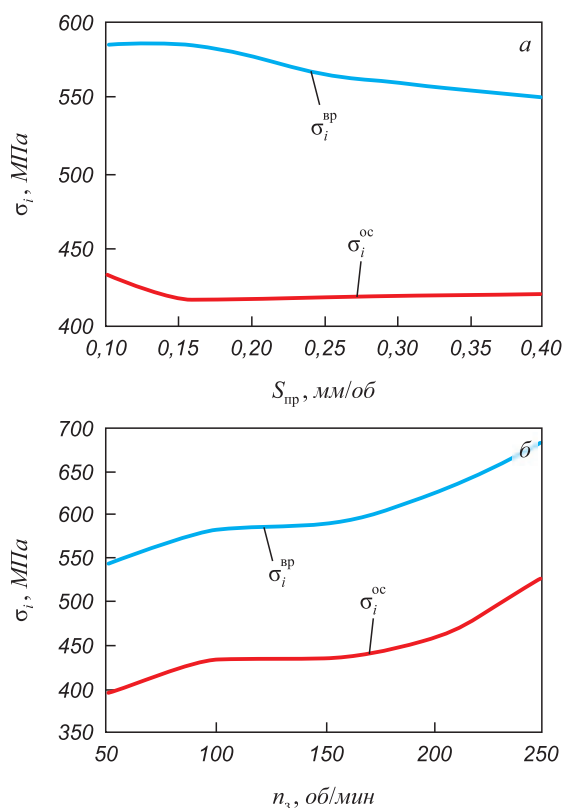


Рис. 4. Зависимость интенсивности максимальных напряжений от продольной подачи рабочего инструмента (а) и частоты вращения заготовки (б)

Fig. 4. Dependence of the maximum stresses intensity on longitudinal supply of the working tool (a) and the workpiece rotation frequency (b)

**Интенсивность максимальных напряжений
в зависимости от марки материалов**

**Intensity of maximum stresses depending
on the grade of materials**

Материал	Интенсивность максимальных напряжений	
	$\sigma_i^{вр}$	$\sigma_i^{ос}$
Магнийевый сплав МА12 ($E = 45$ ГПа, $\sigma_T = 193$ МПа)	297	149
Алюминиевый сплав АМг6Н ($E = 71$ ГПа, $\sigma_T = 280$ МПа)	355	205
Титановый сплав ВТ6 ($E = 96$ ГПа, $\sigma_T = 930$ МПа)	1096	476
Нержавеющая сталь 08Х18Н10 ($E = 193$ ГПа, $\sigma_T = 210$ МПа)	524	338
Конструкционная сталь 20 ($E = 200$ ГПа, $\sigma_T = 250$ МПа)	542	366
Медный сплав Л90 ($E = 110$ ГПа, $\sigma_T = 280$ МПа)	392	281

одинаковом пределе текучести $\sigma_T = 280$ МПа (алюминиевый и медный сплавы) большие напряжения возникают у материала с более высоким модулем упругости.

Выводы

На основе компьютерного моделирования разработана конечно-элементная модель орбитального поверхностного деформирования для определения напряженного состояния в очаге деформации и остаточных напряжений в поверхностном слое детали в зависимости от основных параметров упрочнения. Полученные результаты исследования достаточно хорошо согласуются с физическими закономерностями образования остаточных напряжений при упругопластическом деформировании.

При орбитальном поверхностном деформировании максимальные временные напряжения больше на 15 %, а остаточные напряжения сжатия, которые формируются в поверхностных слоях, больше на 20 % по сравнению с традиционной обкаткой шаром.

Интенсивность максимальных временных и остаточных напряжений зависит от угла наклона рабочего инструмента и достигает максимума при $\alpha = 45^\circ$. Увеличение величины натяга и частоты вращения заготовки приводит к росту интенсивности напряжений и наоборот, при увеличении подачи рабочего инструмента интенсивность напряжений снижается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зайдес С.А. Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001. – 309 с.
2. Шефтель Н.И. Улучшение качества и сортамента проката. – М.: Металлургия, 1973. – 343 с.

3. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1989. – 253 с.
4. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1987. – 152 с.
5. Totten G., Howes M., Inoue T. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. – USA: ASM International, Materials Park, Ohio, 2002. – 500 p.
6. Handbook of Residual Stress and Distortion of Steel / G. Totten, M. Howes, T. Inoue. Publications for ASTM (The American Society for Testing and Materials), 2002. – 449 p.
7. Ebert L.J. The role of residual stresses in the mechanical performance of case carburized steel // Metal Transactions A. 1978. Vol. 9A. P. 1537 – 1551.
8. Swic A., Taranenko V., Wolos D. New method for machining of low-rigidity shafts // Advances in Manufacturing Science and Technology. 2010. Vol. 34. No. 1. P. 59 – 71.
9. Скороходов А.Н., Зудов Е.Г., Киричков А.А., Петренко Ю.П. Остаточные напряжения в профилях и способы их снижения. – М.: Металлургия, 1985. – 185 с.
10. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
11. Dimarogonas A.D. Dynamic instability of shafts during machining // Journal of Sound and Vibration. 1986. Vol. 108. No. 2. P. 181 – 189.
12. Kramer I.R. Effect of surfaces on mechanical behavior of metals // Surface Phenomena. Bonis L.J., Bruyn P.L., Duga J.J. eds. Springer US, 1995. P. 171 – 193.
13. Bussu G., Irving P.E. The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024-T351 aluminium joints // Int. Journal of Fatigue. 2003. Vol. 25. No. 1. P. 77 – 88.
14. Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А., Махалов М.С. Современные конкурентоспособные технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 7. С. 7 – 12.
15. Лебедев В.А. Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки / Под ред. А.В. Киричек. – М.: Издательский дом «Спектр», 2014. – 403 с.
16. Зайдес С.А. Новые способы поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т. 16. № 3. С. 129 – 139.
17. Зайдес С.А., Нгуен Ван Хуан. Определение остаточных напряжений в калиброванных прутках // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 2. Р. 109 – 115.
18. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник: в 2-х томах. Т. 1 / Под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2014. – 480 с.
19. Блюменштейн В.Ю., Махалов М.С. Влияние режимов на формирование остаточных напряжений в поверхностном слое при размерном совмещенном обкатывании // Обработка металлов. 2008. № 2. С. 15 – 22.
20. Hauk V. Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods: Evaluation, Application, Assessment. – Amsterdam: Elsevier Science B.V. 1997. – 640 p.
21. Пат. 2019105314 RU. Способ поверхностного пластического деформирования / Зайдес С.А., Фам Ван Ань; заявл. 26.02.2019; опубл. 29.11.2019.
22. Баков К.А. ANSYS. Справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
23. Бруйка В.А., Фокин В.Г., Кураева Я.В. Инженерный анализ в ANSYS Workbench. – Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2013. – 109 с.

Поступила в редакцию 10 января 2020 г.
После доработки 30 января 2020 г.
Принята к публикации 16 октября 2020 г.

QUALITY IMPROVEMENT OF CALIBRATED STEEL BY SURFACE DEFORMATION. PART 1. DETERMINATION OF THE STRESSED STATE OF CYLINDERICAL PARTS DURING ORBITAL SURFACE DEFORMATION

S.A. Zaides, Pham Van Anh

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Cold drawn calibrated steel is an effective blank for the manufacture of low-rigid cylindrical parts such as shafts and axles. High accuracy of the diametric size along the length of the workpiece, low surface roughness, increased hardness and strength of the surface layer compared to hot rolled products allow us to produce a variety of parts with high metal utilization and high machining performance. The main disadvantage of calibrated metal is the residual stresses that occur during pressure treatment. To reduce or change the nature of the distribution over the cross section, it is proposed to use small plastic deformations in the surface layer of the hire. Known in practice methods of surface plastic deformation (PPD) usually lead to the curvature of non-rigid workpieces. To intensify the stress-strain state in the deformation zone, we propose a method of orbital surface deformation. Based on the finite element modeling, influence of the main parameters of orbital surface deformation on stress state in the deformation zone and residual stresses in the finished products is considered. Compared with the traditional PPD process, the stress intensity during orbital surface deformation will increase by 10 – 15 %. The residual compressive stresses that form in the surface layers reach 70 – 85 % of the material tensile strength. In the second part of the article, it is supposed to provide information on a more effective method of surface deformation and on the change in initial residual stresses that are formed during the calibration of cylindrical rods.

Keywords: calibrated steel, non-rigid cylindrical parts, surface layer, stress intensity, residual stresses, stress state, orbital surface deformation, working tool kinematics, finite element modeling.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-802-807

REFERENCES

1. Zaides S.A. *Okhvatyayushchee poverkhnostnoe plasticheskoe deformirovaniye* [Encompassing Surface Plastic Deformation]. Irkutsk: Izd-vo IrGTU, 2001, 309 p.
2. Sheftel' N.I. *Uluchshenie kachestva i sortamenta prokata* [Improving the Quality and Range of Products]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 343 p. (In Russ.).
3. Vishnyakov Y.D., Piskarev V.D. *Upravlenie ostatochnymi napryazheniyami v metallakh i splavakh* [Management of Residual Stresses in Metals and Alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 253 p. (In Russ.).
4. Papshev D.D. *Otdelochno-uprochnyayushchaya obrabotka poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Finishing and Hardening Treatment by Surface Plastic Deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 152 p. (In Russ.).
5. Totten G., Howes M., Inoue T. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. USA: ASM International, Materials Park, Ohio, 2002, 500 p.
6. *Handbook of Residual Stress and Distortion of Steel*. Totten G., Howes M., Inoue T. eds. Publications for ASTM (The American Society for Testing and Materials), 2002, 449 p.
7. Ebert L.J. The role of residual stresses in the mechanical performance of case carburized steel. *Metal Transactions A*. 1978, vol. 9A, pp. 1537–1551.
8. Swic A., Taranenko V., Wolos D. New method for machining of low-rigidity shafts. *Advances in Manufacturing Science and Technology*. 2010, vol. 34, no. 1, pp. 59–71.
9. Skorokhodov A.N., Zudov E.G., Kirichkov A.A., Petrenko Yu.P. *Ostatochnye napryazheniya v profilyakh i sposoby ikh snizheniya*

[Residual Stresses in the Profiles and Ways to Reduce Them]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 185 p. (In Russ.).

10. Odintsov L.G. *Uprochnenie i otdelka detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem: spravochnik* [Hardening and Finishing of Parts by Surface Plastic Deformation: a Guide]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 328 p. (In Russ.).
11. Dimarogonas A.D. Dynamic instability of shafts during machining. *Journal of Sound and Vibration*. 1986, vol. 108, no. 2, pp. 181–189.
12. Kramer I.R. Effect of surfaces on mechanical behavior of metals. In: *Surface Phenomena*. Bonis L.J., Bruyn P.L., Duga J.J. eds. Springer US, 1995, pp. 171–193.
13. Bussu G., Irving P.E. The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024-T351 aluminium joints. *Int. Journal of Fatigue*. 2003, vol. 25, no. 1, pp. 77–88.
14. Blyumenshtein V.Yu., Krechetov A.A., Makhalov M.S. Modern competitive technologies for finishing and hardening processing by surface plastic deformation. *Uprochnyayushchie technologii i pokrytiya*. 2012, no. 7, pp. 7–12. (In Russ.).
15. Lebedev V.A. *Effektivnye technologii poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya i kombinirovannoi obrabotki* [Effective Technologies of Surface Plastic Deformation and Combined Processing]. Kirichkov A.V. ed. Moscow: ID "Spectr", 2014, 403 p. (In Russ.).
16. Zaides S.A. New methods of surface plastic deformation in the manufacture of machine parts. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 129–139. (In Russ.).
17. Zaides S.A., Nguyen Van Huan. Determination of residual stresses in the calibrated roll. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 2, pp. 109–115. (In Russ.).
18. *Tekhnologiya i instrumenty otdelochno-uprochnyayushchei obrabotki detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem: spravochnik: v 2-kh tomakh. T. 1* [Technology and Tools for Finishing and Hardening of Parts by Surface-Plastic Deformation: a Reference Book in 2 Vols. Vol. 1]. Suslov A.G. ed. Moscow: Mashinostroenie, 2014, 480 p. (In Russ.).
19. Blyumenshtein V.Yu., Makhalov M.S. Influence of the modes on formation of residual stresses in surface layer during dimensional combined rolling. *Obrabotka metallov*. 2008, no. 2, pp. 15–22. (In Russ.).
20. Hauk V. *Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods: Evaluation, Application, Assessment*. Amsterdam: Elsevier Science B.V. 1997, 640 p.
21. Zaides S.A., Pham Van Anh. *Sposob poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya* [The method of surface plastic deformation]. Patent RF no. 2019105314, publ. 29.11.2019. (In Russ.).
22. Bakov K.A. *ANSYS. Spravochnik pol'zovatelya* [ANSYS. User Reference]. Moscow: DMK Press, 2005, 640 p. (In Russ.).
23. Bruyaka V.A., Fokin V.G., Kuraeva Y.V. *Inzhenernyi analiz v ANSYS Workbench* [Engineering Analysis at ANSYS Workbench]. Samara: Samar. gos. tekhn. un-t, 2013, 109 p. (In Russ.).

Information about the authors:

S.A. Zaides, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Engineering Technology and Materials" (zsa@istu.edu)

Pham Van Anh, Postgraduate of the Chair "Engineering Technology and Materials" (vananhtd0202@gmail.com)

Received January 10, 2020

Revised January 30, 2020

Accepted October 16, 2020

УДК 621.982.45

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПРАВКЕ ГОРЯЧЕКАТАНЫХ ПОЛОС В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Котов К.А.¹, менеджер по моделированию дирекции по техническому развитию
и качеству (ka.kotov@severstal.com)

Болобанова Н.Л.², к.т.н., доцент кафедры металлургии, машиностроения
и технологического оборудования (nlbolobanova@chsu.ru)

Нуштаев Д.В.¹, к.т.н., менеджер по моделированию дирекции по техническому
развитию и качеству (dv.nushtae@severstal.com)

¹АО «Северсталь Менеджмент»

(162608, Россия, Вологодская обл., Череповец, ул. Мира, 30)

²Череповецкий государственный университет

(162600, Россия, Вологодская обл., Череповец, пр. Луначарского, 5)

Аннотация. Основной завершающей стадией производства горячекатаного проката является правка на роликовых правильных машинах (РПМ) в условиях циклической знакопеременной деформации. Из-за высвобождения остаточных напряжений, неравномерно распределенных по объему металла, при резке листа с применением высокотехнологичных методов он может искривляться. Подавляющее большинство моделей расчета процесса правки в условиях циклической знакопеременной деформации не обеспечивает адекватной оценки и прогнозирования остаточных напряжений в тонком стальном листе. В работе обоснована актуальность дальнейшего развития описания напряженного состояния полосы при правке на основе применения вычислительной среды конечно-элементного анализа SIMULIA Abaqus. Описана реализация модели процесса правки горячекатаной полосы на РПМ. Установлена адекватность получаемых в результате моделирования значений усилий правки стальных полос экспериментальным данным. Экспериментально подтверждена сходимость результатов моделирования с данными измерений неплоскостности полосок, получаемых после раскроя листов плазмой. Определено, что после правки на верхней поверхности листа остаются растягивающие продольные остаточные напряжения, на нижней – сжимающие, в середине по толщине они равны нулю, а в остальных частях сечения значения напряжений противоположны по знаку. Установлено, что одинаковые параметры процесса правки полос разных категорий прочности приводят к различным отклонениям напряжений по толщине. Рост предела текучести полосы приводит к увеличению отклонений напряжений по толщине полосы. Метод моделирования процесса правки предлагается использовать для исследования напряженно-деформированного состояния горячекатаного проката и проектирования усовершенствованных режимов правки полос с обеспечением минимальных отклонений листов после их высокотехнологичной обработки.

Ключевые слова: горячекатаная полоса, напряжения, роликовая правильная машина, циклическая знакопеременная деформация, моделирование, метод конечных элементов.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-808-814

ВВЕДЕНИЕ

Основной завершающей стадией производства горячекатаного проката является правка на роликовых правильных машинах (РПМ), где полоса многократно последовательно изгибается при прохождении между роликами (рис. 1). Исправление неплоскостности полос на этой машине достигается знакопеременным упругопластическим изгибом, максимальным в первых роликах, постепенно уменьшающимся к последним за счет наклона верхней и неподвижной нижней кассет.

После правки лист, не имеющий неплоскостности, при резке с применением высокотехнологичных методов, например таких, как лазерная или плазменная резка, может искривляться. При этом отклонение от плоскости контрольной плиты нередко превышает тре-

бования, установленные стандартом. На рис. 2 показан изгиб горячекатаного листа толщиной 3 мм после раскроя на установке плазменной резки на полоски шириной 100 мм и длиной 2 м. Отклонение от плоскостности у краевых полосок в этом случае составляло 70 мм. Риск возникновения таких деформаций во время и после раскроя вынуждает потребителей металлопроката запрашивать обеспечение плоскостности деталей и после обработки листов.

Отклонение от плоскостности получаемых деталей на установках лазерной или плазменной резки объясняется высвобождением остаточных напряжений, неравномерно распределенных по объему металла [1]. Поэтому решение вопроса прогнозирования уровня остаточных напряжений в горячекатаных листах после завершающей стадии производства – правки на РПМ с обеспечением плоскостности после обработки

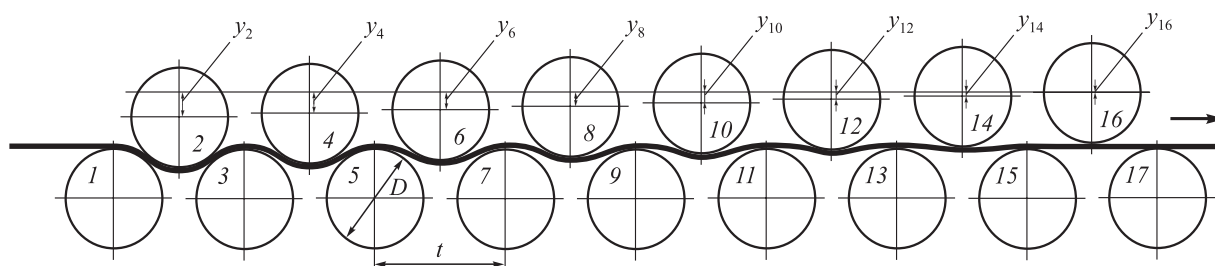


Рис. 1. Схема 17-роликовой правильной машины:
 $y_2 - y_{16}$ – смещения осей верхних роликов по вертикали; D – диаметр роликов; t – шаг роликов

Fig. 1. Scheme of 17-roller leveller:
 $y_2 - y_{16}$ – upper roller displacements; D – rollers diameter; t – pitch



Рис. 2. Деформация листа после плазменной резки

Fig. 2. Sheet deformation after plasma cutting

высокотехнологичными методами актуально для прокатного производства.

Вопросам моделирования и изучения процесса правки в условиях циклической знакопеременной деформации посвящено большое количество исследований. В работах отечественных авторов [2 – 8] теоретический анализ и расчеты изгиба полос при правке основаны на гипотезе плоских сечений и предположении одноосного напряженно-деформированного состояния, что позволяет определять кривизну проката, энергосиловые параметры и максимальные значения напряжений при правке. При этом здесь не учитываются такие факторы, как трение при правке, скорость правки, исходная искривленность полосы. Применить их для раскрытия закономерностей распределения внутренних напряжений по толщине и ширине металла при правке горячекатаных полос не представляется возможным. В работах зарубежных авторов [9 – 14] активно используется метод конечных элементов для решения вопросов настройки роликовых правильных машин. Однако проблемы, связанные с оценкой внутренних напряжений, не затрагиваются. Авторы работы [15] проводили эксперимент на лабораторной 13-роликовой правильной машине и оценивали усилия, действующие на ролики. Авторы работ [16 – 18] рассматривали процесс правки, выполняя экспериментальные и численные исследования циклических испытаний пластины на изгиб,

исследовали вопросы управления кривизной листа после правки путем перемещения последнего верхнего ролика. В работе [18] высказывается предположение о возможности адаптации распределения остаточных напряжений по толщине в зависимости от перекрытия роликов и приводятся результаты моделирования распределений напряжений по толщине после правки в 7-роликовой правильной машине полосы из низкоуглеродистой стали DC01 толщиной 2 мм. При этом рассматривалась РПМ с независимой настройкой верхних роликов, что крайне редко применяется на практике, а также не было представлено, как в разработанной модели с использованием среды SIMULIA Abaqus учитывалась упругая разгрузка материала после правки, задавалось контактное взаимодействие полосы и роликов. Результаты исследований процесса правки в системе DEFORM, представленные в работах [1, 19, 20], также не учитывают упругое изменение напряжений в полосе после того, как она вышла из роликовой правильной машины и на нее перестали действовать внешние силы.

Для устранения выявленных недостатков в данной работе рассматривается дальнейшее развитие описания напряженного состояния полосы при правке знакопеременной циклической деформацией на основе применения вычислительной среды конечно-элементного анализа SIMULIA Abaqus.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Реализация модели процесса правки горячекатаной полосы на РПМ включала следующие этапы.

1. Создание конечно-элементной модели полосы, размещаемой между верхними и нижними роликами. На рис. 3 в качестве примера показана настройка конечно-элементной модели правки полосы в 17-роликовой правильной машине. Принималась упругопластическая модель полосы, поведение стального материала полосы описывалось с кинематическим упрочнением, полученным при знакопеременном нагружении образцов на универсальной испытательной машине. Также в расчете использовались следующие характеристики материала полосы: плотность $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$; коэффициент Пуассона $\nu = 0,3$; модуль упругости первого рода $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Для сокращения вычислительных затрат конечно-элементная модель полосы длиной 3000 мм имела участок с 36-ю элементами по толщине длиной 700 мм, располагаемый перед началом правки на входе в РПМ. На остальных участках модель полосы была сформирована из четырех элементов по толщине. Тип элементов модели полосы – четырехузловой гексаэдрический элемент «CPE4R». Использование таких элементов позволяет, несмотря на двухмерную постановку задачи, учесть тензор напряжений по ширине полосы, задав в этом направлении размер элемента, равным реальной ширине полосы – 1500 мм. В этом случае учитывается сила тяжести полосы. Каждый ролик представлен жестким оболочным элементом «R2D2».

Для описания контактного взаимодействия между роликами и заготовкой использовались встроенные возможности системы SIMULIA Abaqus, позволяющие учитывать статический и динамический коэффициент трения. При отсутствии касательных перемещений в контактной паре, что соответствует перемещению роликов вниз, задавался статический коэффициент трения, равный 0,25, а после начала движения полосы – динамический, равный 0,12.

2. Перемещение верхних роликов вниз в рабочее положение с обеспечением заданной величины перекрытия или зазора между верхними и нижними роликами.

3. Приложение силы тяжести к системе при отсутствии движения роликов.

4. Задание скорости вращения роликов для моделирования движения полосы за счет сил трения между ней и роликами.

5. Оценка упругой разгрузки материала после правки.

Первый и третий этапы – динамические с заданием поступательного и вращательного движения роликов РПМ, остальные – статические без задания движения роликов.

Адекватность модели оценивалась путем сравнения усилий, действующих на ролики, полученных расчетным методом и измеренных в результате эксперимента на лабораторной 13-роликовой правильной машине инженерами фирмы Fagor Arrasate [15]. Рассматривался процесс правки полосы толщиной 1,5 мм из стали TRIP700 с пределом текучести 491 МПа и пределом прочности 800 МПа. Диаметры рабочих роликов 45 мм, шаг роликов 48 мм, перемещение первого верхнего ролика на входе РПМ составляло $y_2 = 2,6 \text{ мм}$, на выходе – $y_{12} = 0,22 \text{ мм}$.

По результатам моделирования построен график изменения усилий, действующих на ролики в процессе правки (рис. 4, кривая 1). Сравнение его с кривой 2 на рис. 4, полученной в работе [15] при правке полосы в 13-роликовой машине, показал, что среднее значение погрешности расчета не превышает 10 %. Также на рис. 4 приведена кривая 3, полученная при моделировании процесса правки в системе Abaqus с изотропной моделью материала. Видно, что в этом случае не происходит снижения усилия на ролики в процессе правки из-за упрочнения материала.

Исходя из полученных результатов, был сделан вывод, что разработанная конечно-элементная модель с кинематическим упрочнением материала, учитывающим эффект Баушингера, с достаточной точностью

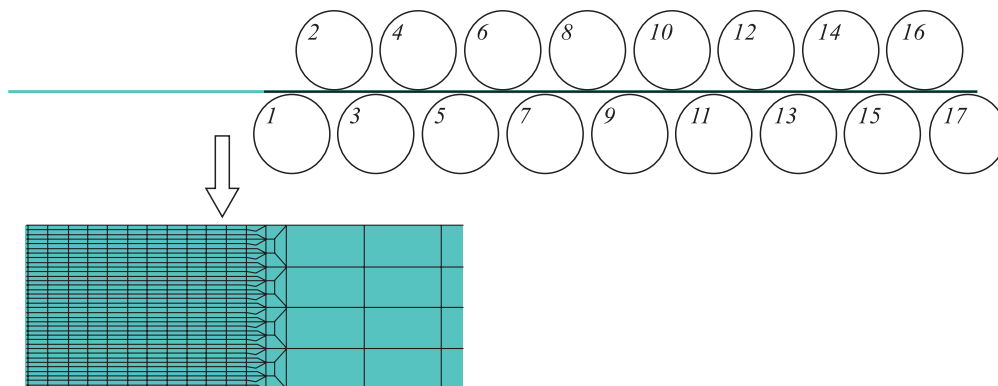


Рис. 3. Настройка модели: диаметр роликов $D = 80 \text{ мм}$; шаг роликов $t = 89 \text{ мм}$; толщина полосы $h = 3 \text{ мм}$

Fig. 3. Simulation model settings: rollers diameter $D = 80 \text{ мм}$; roller pitch $t = 89 \text{ мм}$; strip thickness $h = 3 \text{ мм}$

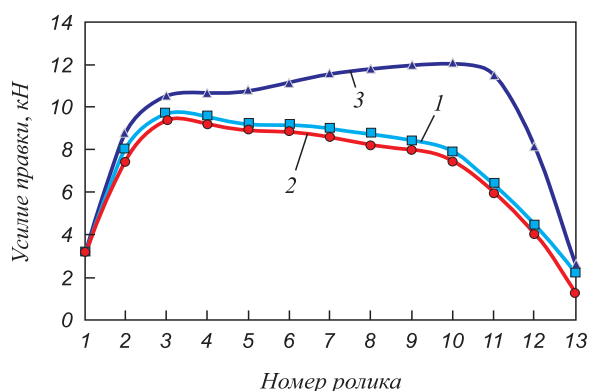


Рис. 4. Результаты изменения усилия правки, полученные: 1 – при моделировании с кинематической моделью материала полосы; 2 – в лабораторном эксперименте; 3 – при моделировании с изотропной моделью материала полосы

Fig. 4. Roller reaction forces: 1 – simulation with isotropic material hardening; 2 – experiment; 3 – simulation with kinematic material hardening

определяет напряженно-деформированное состояние полосы при правке.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для изучения влияния параметров процесса правки на изгиб листов после плазменной резки был выполнен промышленный эксперимент, включающий правку горячекатаной полосы толщиной 3 мм и шириной 1500 мм из стали S355MC на 15-роlikовой правильной машине фирмы LDM, установленной в АПР-3 ПАО «Северсталь». Также произведен отбор листов и их порезка на машине плазменной резки SatroniK LS3000. В промышленном эксперименте отобрано четыре листа размером 3×1500×3000 мм. Отклонения полосок от плоскостности после резки листов определялись согласно разработанной методике, включающей порезку листа на продольные полоски шириной 100 мм, отрезку участков длиной не менее 500 мм по краям полосок для исключения влияния механического реза после правки

и определение величины фактического изгиба каждой полоски длиной 2000 мм.

Выбранные четыре режима правки, отличающиеся величиной наклона верхней кассеты роликов $\Delta = y_2 - y_{14}$, полученные при моделировании максимальные напряжения и результаты измерений отклонений полосок после плазменной резки представлены в табл. 1. Скорость правки v составляла 1,6 м/с.

Анализ результатов, полученных после резки, позволил сделать следующие выводы:

– наименьшие отклонения от плоскостности после порезки имели листы, прошедшие правку по режиму № 3, что совпало с результатами моделирования – он характеризуется меньшим значением напряжений при правке;

– разработанная модель правки в среде конечно-элементного анализа SIMULIA Abaqus может быть использована для исследования напряженно-деформированного состояния горячекатаного проката и проектирования усовершенствованных режимов правки полос с обеспечением минимальных отклонений листов после их высокотехнологичной обработки.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для определения характера распределения напряжений после правки рассматривалась знакопеременная циклическая деформация горячекатаной полосы в 17-роlikовой правильной машине (см. рис. 1) с диаметром роликов $D_p = 80$ мм и шагом роликов $t = 89$ мм для варианта перемещений верхних роликов $y_2 \dots y_{16}$, представленного в табл. 2. В качестве материала полосы толщиной 3 мм взяты стали S235MC и S355MC, как наиболее подходящие для всех видов резки, включая лазерную, и поэтому широко востребованные современным машиностроительным производством, применяющим высокотехнологичные методы раскроя металла.

На рис. 5, а приведен фрагмент распределений напряжений по толщине горячекатаной полосы из ста-

Таблица 1

Значения перемещений верхних роликов вниз при правке в 15-роlikовой РПМ и результаты моделирования напряжений и измерений отклонений полосок после плазменной резки

Table 1. Upper roller displacements of 15-roller leveller, stress state results after levelling and deformation of strip after plasma cutting

Номер режима	Перемещение роликов, мм							Δ , мм	$\sigma_{\max}$, МПа	Число полосок, имеющих отклонения более 5 мм	Максимальное отклонение полосок
	y_2	y_4	y_6	y_8	y_{10}	y_{12}	y_{14}				
1	4,00	3,83	3,67	3,50	3,30	3,17	3,00	1,0	297	9	45
2	4,50	4,25	4,00	3,75	3,50	3,25	3,00	1,5	294	8	40
3	5,00	4,50	4,00	3,50	3,00	2,50	2,00	3,0	284	1	35
4	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	0	305	10	100

Параметры процесса правки полос толщиной 3 мм на 17-роликовой правильной машине

Table 2. Settings modes for leveling strips with thickness of 3 mm on 17-roller leveller

Сталь	Перемещение роликов, мм								v, м/с
	y_2	y_4	y_6	y_8	y_{10}	y_{12}	y_{14}	y_{16}	
S235MC и S355MC	6,00	5,57	5,14	4,71	4,29	3,86	3,43	3,00	1

ли S235MC на выходе из РПМ при ее прохождении между тремя последними роликами. Видно, что под последним верхним роликом № 16 верхние волокна сжимаются, а нижние – растягиваются. После выхода из правильной машины происходит упругая разгрузка, которая приводит к снижению и перераспределению внутренних напряжений (рис. 5, б). В сравнении с рис. 5, а, изменяется не только характер распределения напряжений по толщине полосы, но и значения напряжений. После упругой разгрузки они уменьшаются в 1,5 раза.

Для сопоставления напряженного состояния полос из сталей различной категории прочности (S235MC и S355MC) были построены графики распределений напряжений в поперечном сечении полосы на выходе из РПМ под роликом № 16 (рис. 6, а) и после упругой разгрузки (рис. 6, б).

Из рис. 6 видно, что под роликом № 16 в середине полосы на высоте от 1,3 до 1,7 мм от поверхности

имеется участок с упругой деформацией. Напряжения в оставшейся части полосы выше предела текучести, т. е. материал деформируется в упругопластической области. Максимальное отклонение напряжений составляет ± 300 МПа при правке полосы из стали S235MC и ± 480 МПа при правке из стали S355MC. После упругой разгрузки характер распределения напряжений по толщине становится более сложным. Верхние волокна полосы растягиваются, а волокна, расположенные на высоте от 0,5 до 1,5 мм от поверхности, сжимаются. И, наоборот, нижние волокна сжимаются, а далее, на высоте от 0,5 до 1,5 мм от нижней поверхности, растягиваются. В середине толщины полосы также происходит смена знака напряжений. При этом максимальные отклонения напряжений наблюдаются в слоях, расположенных на высоте от 1,1 до 1,4 мм от поверхности (чуть выше и в самой зоне упругих деформаций, отмечаемых на рис. 6, а). Они составляют от -189 МПа до $+184$ МПа в полосе из стали S235MC и от $+279$ МПа до -285 МПа из стали S355MC. Сравнивая эти значения с напряжениями на верхних и нижних волокнах, которые равны соответственно 125 МПа и -120 МПа в прокате из стали S235MC и 192 МПа и -174 МПа из стали S355MC, можно констатировать, что одинаковые параметры процесса правки полос разных категорий прочности приводят к различным отклонениям напряжений по толщине.

Выводы

На основе моделирования процесса правки горячекатаных полос в условиях циклической знакопеременной деформации получено, что после правки на верхней поверхности листа остаются растягивающие продольные остаточные напряжения, на нижней – сжимающие, в середине по толщине они равны нулю, а в остальных частях сечения значения напряжений противоположны по знаку.

Моделированием установлено, что одинаковые параметры процесса правки полос разных категорий прочности приводят к различным отклонениям напряжений по толщине. Рост предела текучести полосы приводит к увеличению отклонений напряжений по толщине полосы.

Предложенный метод моделирования процесса правки, подтвержденный количественным соответ-

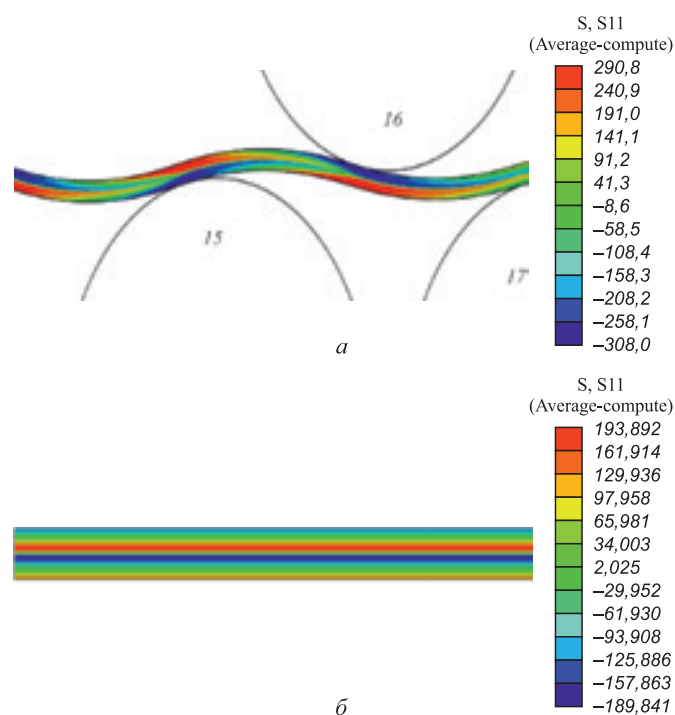


Рис. 5. Распределение напряжений по толщине полосы: а – на выходе РПМ; б – после упругой разгрузки

Fig. 5. Stress distribution over strip thickness: а – at the end of leveller; б – after levelling

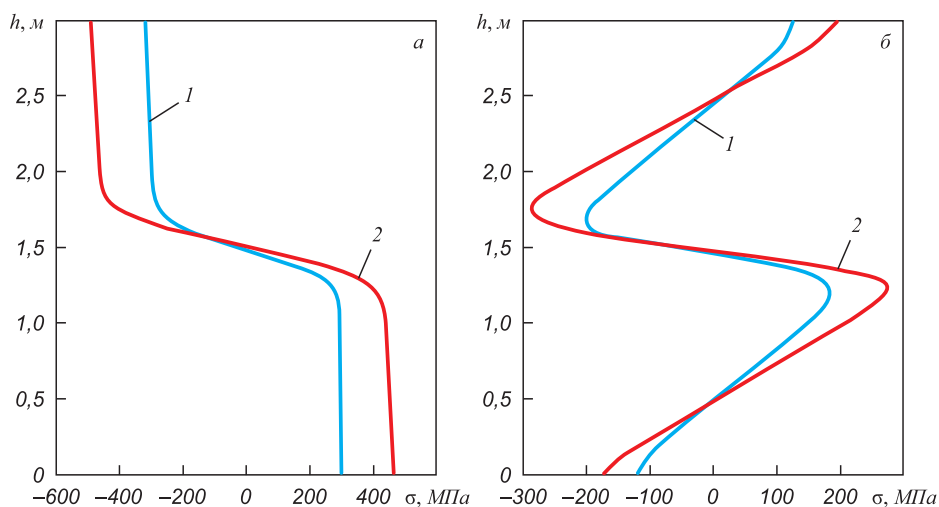


Рис. 6. Распределение напряжений по толщине полосы из сталей:
1 – S235MC; 2 – S355MC; а – под роликом № 16; б – после правки с упругой разгрузкой

Fig. 6. Stress distribution over strip thickness for steel grades:
1 – S235MC; 2 – S355MC; а – at the end of leveller; б – after levelling

вием с опубликованными данными и результатами порезки листов после правки, может быть использован для исследования напряженно-деформированного состояния горячекатаного проката и проектирования усовершенствованных режимов правки полос с обеспечением минимальных отклонений листов после их высокотехнологичной обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Трусов К.А. Применение метода конечных элементов для выявления причин потери плоскостности горячекатаных стальных листов в процессе их лазерной резки // *Металлы*. 2018. № 1. С. 103 – 108.
2. Целиков А.И., Полухин П.И., Гребеник В.М. Машины и агрегаты металлургических заводов. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката. – М.: Металлургия, 1988. – 576 с.
3. Слоним А.З., Сонин Л.А. Машины для правки листового и сортового проката. – М.: Металлургия, 1987. – 232 с.
4. Недорезов И.В. Моделирование процессов правки проката на роликовых машинах. – Екатеринбург: АКВА-пресс, 2003. – 255 с.
5. Шинкин В.Н. Приближенные методы расчета (2n+1)-роликовой листопрямительной машины. Часть 1. Первое приближение // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. 2017. № 2 – 1. С. 40 – 44.
6. Шелест А.Е., Юсупов В.С., Перкас М.М. и др. Разработка методики определения геометрических и деформационных параметров правки металлических листов на роликопрямительных машинах // *Производство проката*. 2016. № 7. С. 2 – 8.
7. Салганик В.М., Зайцев Д.А. Математическое описание процесса холодной правки толстых листов // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2016. Т. 1. № 1. С. 56 – 59.
8. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Васильев Ю.С. Уточнение методики расчета параметров правки толстых листов на роликовой правильной машине // *Сталь*. 2017. №1. С. 35 – 38.
9. Grüber M., Oligschläger M., Hirt G. Adjusting of roller levellers by finite element simulations including a closed-loop control // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 1018. P. 207 – 214.
10. Behrens B.-A., Nadi T.El., Krimm R. Development of an analytical 3D-simulation model of the leveling process // *Journal of Materials Processing Technology*. 2011. Vol. 211. No. 6. P. 1060 – 1068.
11. Madej L., Muszka K., Perzyński K. etc. Computer aided development of the levelling technology for flat products // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 60. No. 1. P. 291 – 294.
12. Liu Z. A new curvature analytical method in plate levelling process // *ISIJ International*. 2018. Vol. 58. No. 6. P. 1094 – 1101.
13. Chen W.A 2.5-dimensional analytical model of cold levelling for plates with transverse wave defects // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2015. Vol. 22. No. 8. P. 664 – 671.
14. Doege E., Menz R., Huinink S. Analysis of the levelling process based upon an analytic forming model // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2002. Vol. 51. No. 1. P. 191 – 194.
15. Silvestre E., Sáenz de Argandoña E., Galdós L., Mendiguren J. Testing and modeling of roll levelling process // *Key Engineering Materials*. 2014. Vol. 611 – 612. P. 1753 – 1762.
16. Grüber M., Hirt G. Numerical investigation of a process control for the roller levelling process based on a force measurement // *Materials Science Forum*. 2015. Vol. 854. P. 249 – 254.
17. Grüber M., Oligschläger M., Hirt G. The effect of the initial stress and strain state in sheet metals on the roller levelling process // *Key Engineering Materials*. 2015. Vol. 651. P. 1023 – 1028.
18. Grüber M., Hirt G. A strategy for the controlled setting of flatness and residual stress distribution in sheet metals via roller levelling // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 207. P. 1332 – 1337.
19. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Трусов К.А. Выявление и устранение причин потери плоскостности горячекатаных стальных листов в процессе их лазерной резки // *Производство проката*. 2017. № 6. С. 11 – 15.
20. Гарбер Э.А., Болобанова Н.Л., Трусов К.А. Моделирование напряжений и деформаций в плоской стальной полосе при ее правке в роликовой правильной машине // *Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2018. № 1. С. 68 – 73.

Поступила в редакцию 20 декабря 2019 г.

После доработки 22 декабря 2019 г.

Принята к публикации 20 октября 2020 г.

MODELING THE STRESS STATE OF STEEL STRIP AT ROLLER LEVELLING MACHINE UNDER CYCLIC ALTERNATING DEFORMATIONS

K.A. Kotov¹, N.L. Bolobanova², D.V. Nushtaev¹

¹JSC Severstal Management, Cherepovets, Vologda Region, Russia

²Cherepovets State University, Cherepovets, Vologda Region, Russia

Abstract. The final stage in the production of hot rolled steel is levelling on roller levellers under cyclic alternating deformation. When laser is cutting a sheet it may bend due to the release of residual stresses that are unevenly distributed over the volume. The majority of roller leveller models for calculating the process under cyclic alternating deformation does not provide an adequate assessment and prediction of residual stresses in a steel sheet. On the basis of finite element analysis, formation of residual stresses owing to roller levelling of hot rolled strip is disclosed. The implementation of a model of the levelling process was performed in SIMULIA Abaqus. Models are verified by comparing forces under the rollers. We have experimentally confirmed the convergence of the simulation results with the measurements of the strip flatness obtained after sheets plasma cutting. It was found that after levelling, tensile longitudinal residual stresses remain on the upper surface of the sheet, compressive ones remain on the lower surface, stresses are zero in the middle in thickness, and the stress values are opposite in sign in the remaining parts of the section. It was established that the same parameters of the levelling process of different strength categories lead to different deviations of stresses. An increase in yield strength of the strip leads to an increase in the deviation of residual stresses along the strip thickness. The proposed method of simulation of roller levelling process should be used to study the stress-strain state of hot-rolled steel and to design improved strip levelling setting modes with minimal residual stress deviations.

Keywords: hot rolled strip, stresses, roller levelling machine, cyclic alternating deformation, modeling, finite element method.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-808-814

REFERENCES

- Garber E.A., Bolobanova N.L., Trusov K.A. Application of the finite element method to reveal the causes of loss of planeness of hot-rolled steel sheets during laser cutting. *Russian Metallurgy (Metallurgy)*. 2018, vol. 2018, no. 1, pp. 103–108.
- Tselikov A.I., Polukhin, P.I., Grebenik, V.M. *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov. T. 3. Mashiny i agregaty dlya proizvodstva i otdelki prokata* [Machines and Units of Metallurgical Plants. Vol. 3. Machines and Units for Production and Finishing of Rolled Products. Textbook]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 576 p. (In Russ.).
- Slonim A.Z., Sonin L.A. *Mashiny dlya pravki listovogo i sortovogo prokata* [Machines for Levelling of Sheet and Long Products. Textbook]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 232 p. (In Russ.).
- Nedorezov I.V. *Modelirovanie protsessov pravki prokata na rolkovykh mashinakh* [Modeling of Levelling Processes on Roller Machines. Textbook]. Ekaterinburg: AKVA-press, 2003, 255 p. (In Russ.).
- Shinkin V.N. Approximate methods for calculating a $(2n + 1)$ -regular sheet levelling machine. Part 1. First approximation. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2017, no. 2, pp. 40–44. (In Russ.).
- Shelest A.E., Yusupov V.S., Perkas M. M., Sheftel' E.N., Prosvirnin V.V., Akopyan K.E. Development of a method for determining the geometric and deformation parameters of metal sheets levelling on roller machines. *Proizvodstvo prokata*. 2016, no. 7, pp. 2–8. (In Russ.).
- Salganik V.M., Zaitsev D.A. Mathematical description of the process of cold levelling of thick sheets. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya*. 2016, vol. 1, no. 1, pp. 56–59. (In Russ.).
- Maksimov E.A., Shatalov R.L., Vasil'ev Yu.S. Refinement of the methodology for calculating the parameters of levelling thick sheets on a roller machine. *Stal'*. 2017, no. 1, pp. 35–38. (In Russ.).
- Grüber M., Oligschläger M., Hirt G. Adjusting of roller levellers by finite element simulations including a closed-loop control. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 1018, pp. 207–214.
- Behrens B.-A., Nadi T.El., Krimm R. Development of an analytical 3D-simulation model of the levelling process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, vol. 211, no. 6, pp. 1060–1068.
- Madej L., Muszka K., Perzyński K., Majta J., Pietrzyk M. Computer aided development of the levelling technology for flat products. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2011, vol. 60, no. 1, pp. 291–294.
- Liu Z. A new curvature analytical method in plate levelling process. *ISIJ International*. 2018, vol. 58, no. 6, pp. 1094–1101.
- Chen W.A. 2.5-dimensional analytical model of cold levelling for plates with transverse wave defects. *Journal of Iron and Steel Research Int*. 2015, vol. 22, no. 8, pp. 664–671.
- Doege E., Menz R., Huinink S. Analysis of the levelling process based upon an analytic forming model. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2002, vol. 51, no. 1, pp. 191–194.
- Silvestre E., Sáenz de Argandoña E., Galdós L., Mendiguren J. Testing and modeling of roll levelling process. *Key Engineering Materials*. 2014, vol. 611–612, pp. 1753–1762.
- Grüber M., Hirt G. Numerical investigation of a process control for the roller levelling process based on a force measurement. *Materials Science Forum*. 2015, vol. 854, pp. 249–254.
- Grüber M., Oligschläger M., Hirt G. The effect of the initial stress and strain state in sheet metals on the roller levelling process. *Key Engineering Materials*. 2015, vol. 651, pp. 1023–1028.
- Grüber M., Hirt G. A strategy for the controlled setting of flatness and residual stress distribution in sheet metals via roller levelling. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 207, pp. 1332–1337.
- Garber E.A., Bolobanova N.L., Trusov K.A. Detection and elimination of reasons of flatness loss in hot-rolled steel sheets during laser-beam cutting. *Proizvodstvo prokata*. 2017, no. 6, pp. 11–15. (In Russ.).
- Garber E.A., Bolobanova N.L., Trusov K.A. Simulation of stresses and deformations in plane steel strip during its straightening in roller leveler. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2018, no. 1, pp. 68–73. (In Russ.).

Information about the authors:

K.A. Kotov, Modeling Manager, Directorate of Technical Development and Quality (ka.kotov@severstal.com)

N.L. Bolobanova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metallurgy, Mechanical Engineering and Technological Equipment" (nlbolobanova@chsu.ru)

D.V. Nushtaev, Cand. Sci. (Eng.), Modeling Manager, Directorate of Technical Development and Quality (dv.nushtaev@severstal.com)

Received December 20, 2019

Revised December 22, 2019

Accepted October 20, 2020

УДК 669.184.142

ЭТАПЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПЯТИСОПЛОВЫХ ФУРМЕННЫХ ГОЛОВОК В КОНВЕРТЕРНОМ ЦЕХЕ ПАО «ДНЕПРОВСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ»

Пантейков С.П., к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов (ser_pant_in@ukr.net)

Днепропетровский государственный технический университет
(51918, Украина, Днепропетровская обл., Каменское, Днепропетровская ул., 2)

Аннотация. Для верхних дутьевых фурм 250-т кислородных конвертеров ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат» предложен ряд сварных конструкций пятисопловых фурменных головок с повышенной стойкостью. Проведенный комплекс промышленных исследований их работы позволил установить, что наибольшей стойкостью обладают устройства, в которых предусмотрено охлаждение зон засоплового пространства наконечника. Достаточно действенными также оказались меры по повышению значений средних скоростей охладителя в сварных конструкциях фурменных головок и увеличению их жесткости. Перенос сварочных швов из меди, удерживающих сопловые вкладыши в медном наконечнике, с его наружной поверхности на внутреннюю оказался неэффективным с точки зрения повышения стойкости фурменной головки. Средняя стойкость головок увеличилась всего на семь плавов – с 78 до 85. Это позволяет утверждать о необходимости полного устранения в головке сварочных швов из меди (как наружных, подвергающихся высокотемпературному и механическому воздействию, так и внутренних), удерживающих сопловые вкладыши в отверстиях сварных наконечника и коллектора фурменной головки. Таким образом, все проведенные мероприятия (перенос сварочных швов с наружной поверхности наконечника на его внутреннюю поверхность, улучшение охлаждения наконечника и его засопловых зон, в которые попадают также участки медных сварочных швов вокруг сопел, а также повышение жесткости сварной конструкции дутьевой головки) привели хоть и к положительным, но сравнительно невысоким результатам. Полученные данные свидетельствуют о том, что сварочные швы, выполненные из меди вокруг сопловых вкладышей, которые удерживаются за счет этого в наконечнике (также и в коллекторе) головки, являются тем лимитирующим звеном, которое не дает значительно поднять стойкость сварных фурменных головок, от использования которых необходимо срочно отказаться.

Ключевые слова: фурменная головка, стойкость, верхняя фурма, сопловый вкладыш, наконечник, коллектор, сварочный шов.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-815-822

ВВЕДЕНИЕ

Конвертерное производство стали в мире характеризуется внедрением ресурсосберегающих методов продувки железуглеродистого расплава и использованием современных конструкций верхних фурм [1 – 24]. Все ведущие металлургические страны мира в конвертерном производстве стали давно применяют [1 – 8] ковано-штампованные наконечники для производства головок к верхним кислородным фурмам и/или используют полностью цельнолитые конструкции фурменных головок [9 – 24]. Однако, несмотря на это, в конвертерных цехах (КЦ) Украины продолжают применять значительно устаревшие сварные конструкции головок фурм (рис. 1, а), особенно в цехах с большегрузными (от 250 т и выше) агрегатами. Для изготовления сварочных конструкций фурменных головок применяется дуговая сварка в среде аргона, которая выполняется полуавтоматом, при 30 В, 300 А, используется флюс К-13 и медная проволока БрКМц3-1, медные изделия разогреваются до температуры 200 – 300 °С. Сопловые вкладыши и наконечники фурменных головок выполняются из меди марки М0 или М1, стальные детали – из конструкционной углеродистой стали обыкновенного качества марки Ст3 или ВСтЗсп.

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ ФУРМЕННЫХ ГОЛОВОК

Сварочные швы вокруг сопел, выполненные из меди, являются самым слабым местом любой сварной фурменной головки в результате их меньшей толщины по сравнению с толщинами соединяемых между собой составных частей головки и низкой плотности меди в получаемых сварочных швах. При этом наружные швы подвергаются агрессивному воздействию со стороны высокотемпературной среды в полости конвертера. Медь сварочных швов не очень прочно скрепляет друг с другом составные части головки, особенно если они выполнены из разнородных металлов, например, из стали и меди. Это имеет место при обваривании медных сопловых вкладышей, вставленных в отверстия, выполненных из стали коллектора (верхней чаши), а так же при сварке стального наружного переходного кольца (соединительного патрубка фурменной головки для стыковки ее с наружной трубой верхней фурмы) с выполненным из меди наконечником (нижней чашей).

Жесткость сварных конструкций головок фурм также очень низкая, так как в них присутствует значительное количество низкопрочных медных сварочных швов (наружных и внутренних швов вокруг сопловых вкладышей; наружного шва, соединяющего наружное

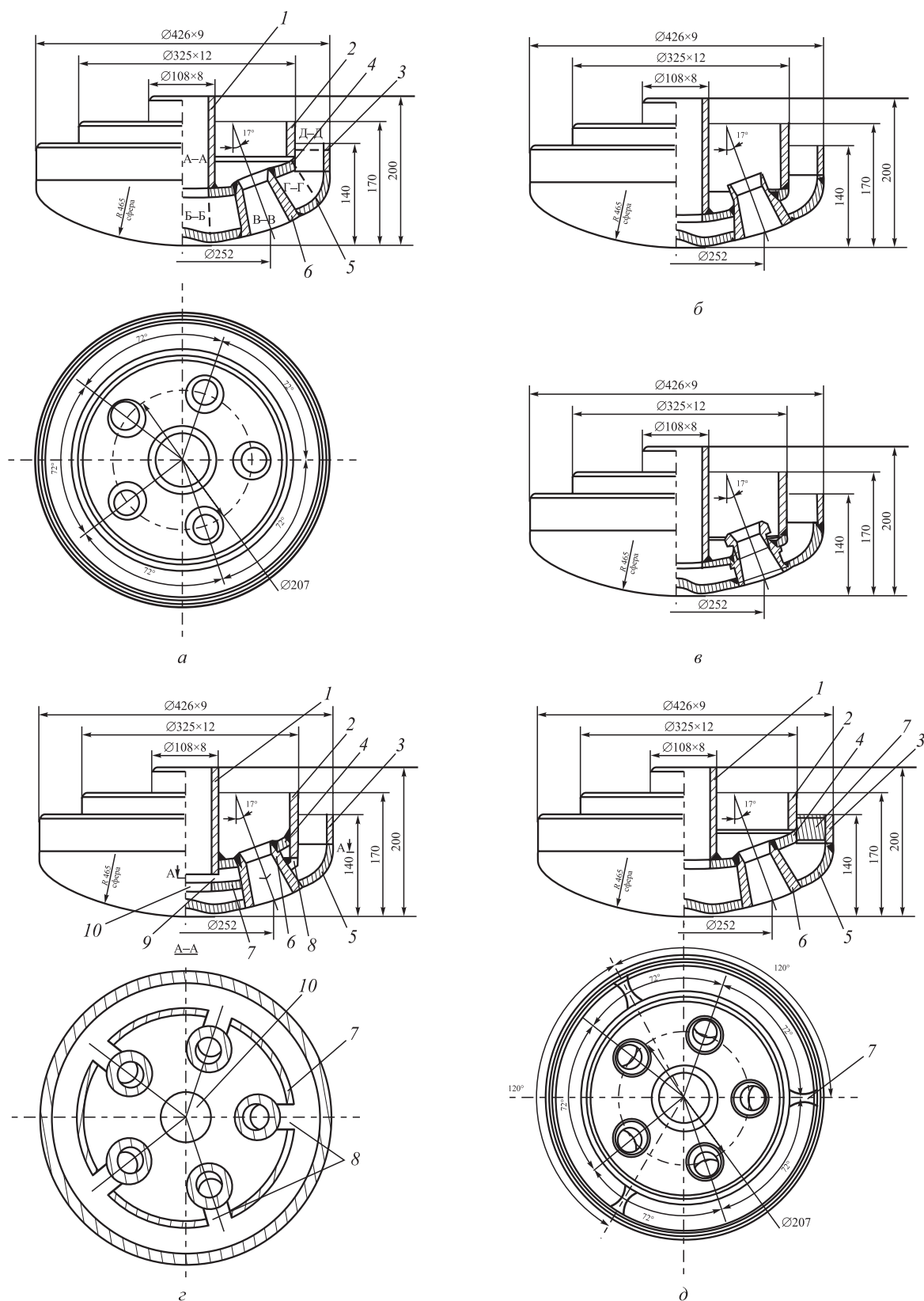


Рис. 1. Сварные конструкции пятисопловых фурменных головок:

а – д – названия конструкций см. в тексте; *1, 2, 3* – патрубки подачи воды, кислорода и отвода воды; *4, 5* – верхняя и нижняя чаши; *б* – сопловый вкладыш; *7* – ребро жесткости (на рис. 1, *д* – разделитель потоков воды); *8* – отверстия для прохода охладителя; *9* – кольцевой зазор; *10* – центральное отверстие

Fig. 1. Welded structures of 5-nozzle lance heads:

а – д – names of structures see in the text; *1, 2, 3* – pipes for water supply, oxygen and water drainage; *4, 5* – upper and lower bowls; *б* – nozzle insert; *7* – stiffener plate (in Fig. 1, *д* – separator of water flows); *8* – holes for the cooler passage; *9* – annular clearance; *10* – central hole

соединительное кольцо с наконечником), что приводит к крайне низкой стойкости сварных конструкций фурменных головок. Именно поэтому уже давно не используются сварные конструкции фурменных головок, а применяются головки [1 – 24], в конструкциях которых присутствует исключительно один наружный сварочный шов из меди, соединяющий наружное переходное кольцо с наконечником¹. Причем в данных конструкциях головок [1 – 24] с целью сохранения на протяжении максимально возможного времени целостности указанного сварочного шва (выполненного к тому же за счет более качественной печной сварки) предусмотрена его разгрузка от возникающих в головке при ее работе термомеханических напряжений. Это значительно увеличит срок эксплуатации фурменной головки, также повышая при этом безопасность работы конструкции верхней фурмы.

С целью повышения стойкости штатных пятисопловых сварных конструкций фурменных головок

(рис. 1, а), используемых в КЦ ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат» (ДМК), осуществлена оптимизация их конструкция. Было уменьшено проходное сечение водоохлаждающего тракта фурменной головки за счет снижения расстояния между верхней и нижней чашами дутьевого устройства с 59 до 25 мм (рис. 1, б). Это значительно улучшило охлаждение наконечника в результате увеличения средних скоростей охладителя в различных сечениях (см. рис. 1, а) водоохлаждающего тракта продувочной головки при неизменных расходах воды.

На рис. 2 приведены графические зависимости расчетных средних скоростей воды в различных сечениях (указанных на рис. 1, а) водоохлаждающих трактов штатной (см. рис. 1, а) и разработанной (см. рис. 1, б) конструкций фурменных головок при расходах охладителя в диапазоне 300 – 500 м³/ч.

Как видно из рис. 2, при расходах охлаждающей воды, принятых в цехе в пределах 320 – 340 м³/ч, рас-

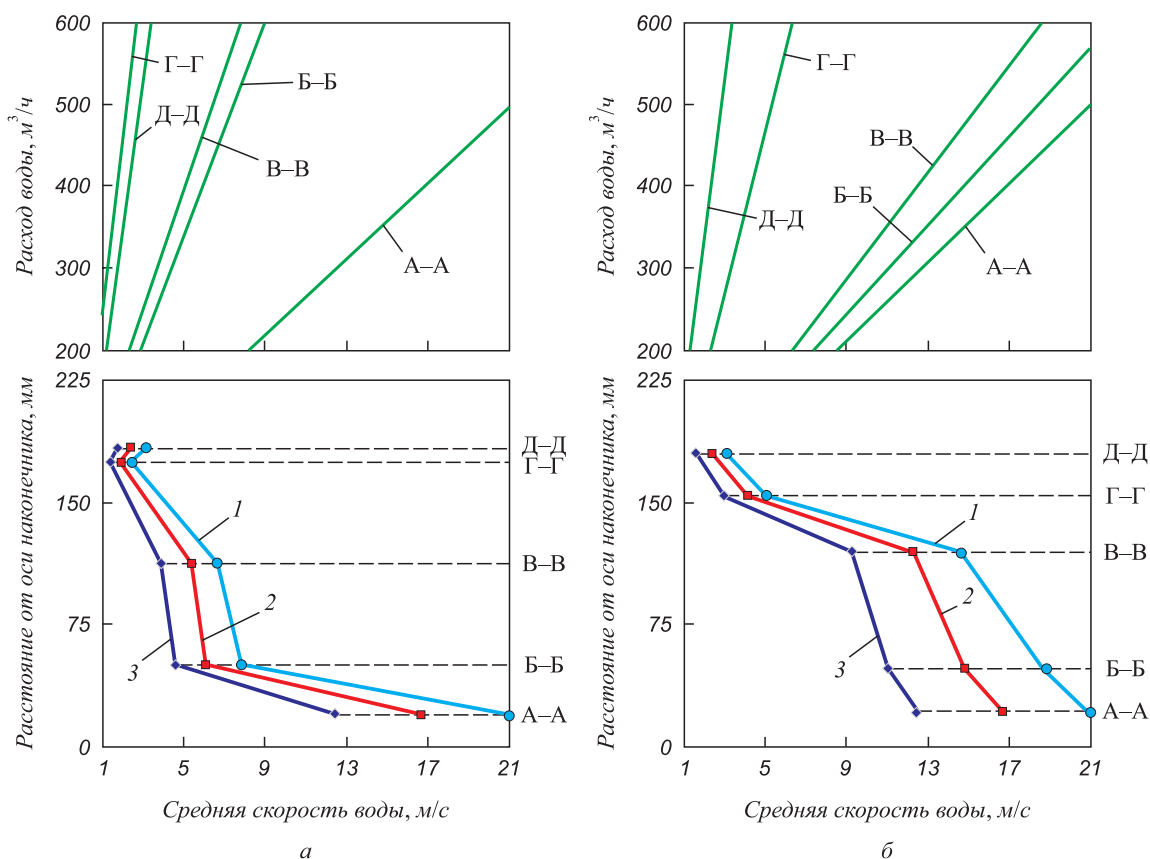


Рис. 2. Зависимости расчетной средней скорости охладителя от его расхода U_b в различных сечениях пятисопловых фурменных головок – штатной (а) и с усовершенствованной системой охлаждения (б):
1 – $U_b = 500$ м³/ч; 2 – $U_b = 400$ м³/ч; 3 – $U_b = 300$ м³/ч

Fig. 2. Dependences of the calculated average cooler speed on its consumption U_b in various sections of 5-nozzle lance heads – standard (a) and with an improved cooling system (б):
1 – $U_b = 500$ м³/hour; 2 – $U_b = 400$ м³/hour; 3 – $U_b = 300$ м³/hour

¹ В конструкциях фурменных головок с ковано-штампованными наконечниками присутствуют также внутренние сварочные швы из меди, соединяющие верхние и нижние части сопел, которые являются цельными изделиями с медными коллектором и наконечником соответственно. Указанные сварочные швы выполняются способом печной сварки (пайки), интенсивно охлаждаются, поэтому имеют высокие качество и прочность.

четные средние скорости охладителя увеличились следующим образом:

- в центральной части фурменной головки (на входе в водоохлаждающий тракт головки, сечение Б–Б) с 4,9 – 5,2 м/с (рис. 2, а) до 11,9 – 12,7 м/с (рис. 2, б);
- в межсопловом пространстве фурменной головки (между сопловыми вкладышами, сечение В–В) с 4,2 – 4,5 м/с (рис. 2, а) до 10,1 – 10,7 м/с (рис. 2, б);
- на периферии фурменной головки (на выходе из водоохлаждающего тракта головки, сечение Г–Г) с 1,4 – 1,5 м/с (рис. 2, а) до 3,4 – 3,6 м/с (рис. 2, б).

Расчетные средние скорости воды в подводящем (перед водоохлаждающим трактом головки, сечение А–А) и в отводящем (за водоохлаждающим трактом головки, сечение Д–Д) трактах верхней фурмы остались неизменными и составляли соответственно 13,4 – 14,2 м/с и 1,9 – 2,0 м/с (рис. 2).

Средняя стойкость фурменных головок с уменьшенным расстоянием между чашами (см. рис. 1, б) составила 78 плавков, т. е. увеличилась² в 1,39 раз по сравнению со средней стойкостью штатных головок (см. рис. 1, а), которая составляла 41 плавку [25].

Для дальнейшего повышения стойкости сварных конструкций фурменных головок с пятью соплами были устранены с наружного торца медных наконечников сварочные швы вокруг сопловых вкладышей за счет приваривания их к внутренней поверхности наконечника (рис. 1, в). Сопловые вкладыши выполнялись из двух частей (верхняя часть изготовлена в виде гайки, свободно выкручивалась и использовалась на последующих головках), что на 40 % уменьшало расход меди на их изготовление. Расстояние между чашами фурменной головки без сварочных швов снаружи наконечника (см. рис. 1, в) выполнялось таким же, как и в предыдущем разработанном варианте конструкции (см. рис. 1, б). Поэтому расчетные средние скорости охлаждающей воды в аналогичных сечениях (см. рис. 1, а) фурменной головки без наружных сварочных швов вокруг сопел (см. рис. 1, в) не изменились (см. рис. 2, б). Средняя стойкость сварных конструкций фурменных головок со сварочными швами на внутренней поверхности наконечника (см. рис. 1, в) составила 85 плавков, т. е. увеличилась³ в 1,51 раза по сравнению со штатными головками (см. рис. 1, а), средняя стойкость которых находилась на уровне 41 плавки [25].

При этом средние скорости воды в зонах засоплового пространства наконечника (непосредственно за соплами) в обеих разработанных конструкциях фурменной головки (см. рис. 1, б, в) практически равнялись нулю из-за расположения сопловых вкладышей на пути движения охладителя и образования застойных зон.

Поэтому дальнейшее совершенствование пятисопловых сварных конструкций фурменных головок

осуществлялось за счет разработки новой конструкции [26], в которой предусматривалось охлаждение зон засоплового пространства наконечника. Для обеспечения сохранения в новой разработанной конструкции [26] фурменной головки (рис. 1, з) значений средних скоростей воды на прежнем уровне при неизменных расходах охладителя (см. рис. 2, б), как и в предыдущих конструкциях головок (см. рис. 1, б, в), расстояние между верхней и нижней чашами было уменьшено до 23 мм. Это связано с тем, что часть охладителя (~10 %) уходила через кольцевой зазор 9 (см. рис. 1, з) в верхнюю часть водоохлаждающего тракта головки, отделенную от его нижней части разделителем потоков воды 7. Из верхней части водоохлаждающего тракта головки этот поток воды поступал через отверстия 8 (см. рис. 1, з) на охлаждение засопловых зон наконечника, что позволило, путем такого распределения воды в головке фурмы [26], повысить ее стойкость. Этот показатель значительно вырос (средняя стойкость фурменных головок с охлаждением засопловых зон наконечника (см. рис. 1, з) составила 172 плавки [27]) в сравнении с пятисопловыми конструкциями головок без охлаждения засопловых зон наконечника, имеющими наружные сварочные швы вокруг сопел (см. рис. 1, а, б):

- в 4,195 раза по сравнению с пятисопловыми штатными головками (см. рис. 1, а), средняя стойкость которых составила 41 плавку [25];

- в 2,205 раза по сравнению с пятисопловыми головками без охлаждения засопловых зон наконечника и с уменьшенной высотой охлаждающего тракта (расстояние между чашами дутьевого устройства составляло 25 мм) фурменной головки (см. рис. 1, б), средняя стойкость которых составила 78 плавков [25].

Расчетная средняя скорость охладителя в засопловых зонах наконечника при этом составляла 10,0 – 10,5 м/с при неизменном общем расходе воды на охлаждение дутьевых устройств в пределах 320 – 340 м³/ч.

С целью увеличения жесткости сварной конструкции пятисопловой фурменной головки, что было продиктовано повышением ее стойкости, была разработана новая «жесткая» конструкция дутьевого устройства [28], в которой выполнялось дополнительное скрепление ребрами жесткости составных частей фурменной головки между собой, уменьшая таким образом нагрузку на все сварочные швы конструкции. Были изготовлены два варианта такой «жесткой» конструкции пятисопловой головки [28], которые имели по три ребра жесткости толщинами 3 и 5 мм (рис. 1, д) соответственно. «Жесткие» сварные конструкции пятисопловой фурменной головки (см. рис. 1, д) показали увеличение средней стойкости в сравнении со штатными головками (см. рис. 1, а): в первой партии (с ребрами жесткости 3 мм) – в 1,63 раза, а во второй (с ребрами жесткости 5 мм) – в 1,75 раза, что составило соответственно 108,4 и 120,2 плавков. Средние стойкости штатных головок

² Исследования проводились под руководством д.т.н., проф. Чернявцева А.Г.

³ Исследования проводились под руководством автора работы.

на момент проведения исследований составляли 66,4 и 68,8 плавов соответственно [29].

Значения средней стойкости штатной и всех разработанных (и перечисленных выше) сварных конструкций пятисопловых фурменных головок к верхним дутьевым устройствам для 250-т конвертеров КЦ ПАО «ДМК» приведены на рис. 3 для их анализа и последующих выводов и рекомендаций.

Проведенный комплекс промышленных исследований работы сварных конструкций пятисопловых фурменных головок на большегрузных 250-т агрегатах КЦ ПАО «ДМК» позволил установить, что наибольшей стойкостью обладают устройства, в которых предусмотрено охлаждение зон засоплового пространства наконечника (см. рис. 3)⁴.

Достаточно действенными также оказались меры по повышению значений средних скоростей охладителя в сварных конструкциях фурменных головок и увеличению их жесткости (см. рис. 3). При этом средние скорости воды в отводящем тракте верхней фурмы (за водоохлаждающим трактом головки, сечение Д–Д, см. рис. 1, а), в том числе и в предложенных конструкциях дутьевых устройств с повышенной стойкостью (см. рис. 1, б–д), являются крайне недостаточными (1,9–2,0 м/с при расходах воды 320–340 м³/ч, см. рис. 2) для осуществления надлежащего охлаждения боковой поверхности наконечников и наружной трубы фурмы в области их стыковки друг с другом и выше. Также в разработанных пятисопловых сварочных конструкциях фурменных головок с уменьшенным проходным сечением их водоохлаждающего тракта (см. рис. 1, б–г) были

недостаточны и средние скорости охладителя на периферии наконечника (на выходе из водоохлаждающего тракта головки, сечение Г–Г), которые увеличились с 1,4–1,5 м/с (штатная и разработанная «жесткая» конструкции, см. рис. 1, а, д) до 3,4–3,6 м/с (разработанные конструкции с уменьшенными расстояниями между чашами головки, см. рис. 1, б–г). Однако при этом они также не могли обеспечить эффективное охлаждение наконечников при указанных невысоких средних скоростях воды, расход которой составлял 320–340 м³/ч.

Перенос сварочных швов из меди, удерживающих сопловые вкладыши в медном наконечнике, с его наружной поверхности (см. рис. 1, б) на внутреннюю (см. рис. 1, в) оказался неэффективным с точки зрения повышения стойкости фурменной головки. Средняя стойкость головок увеличилась всего на семь плавов – с 78 до 85 плавов (см. рис. 3). Это позволяет утверждать о необходимости полного устранения в головке сварочных швов из меди (как наружных, подвергающихся высокотемпературному и механическому воздействию, так и внутренних, испытывающих напряжения), удерживающих сопловые вкладыши в отверстиях сварных наконечника и коллектора фурменной головки.

Таким образом, все проведенные мероприятия:

- перенос сварочных швов с наружной поверхности наконечника на его внутреннюю поверхность (см. рис. 1, в);
- улучшение охлаждения наконечника (см. рис. 1, б–г) и его засопловых зон (см. рис. 1, г), в которые попадают также участки наружных медных сварочных швов вокруг сопел;

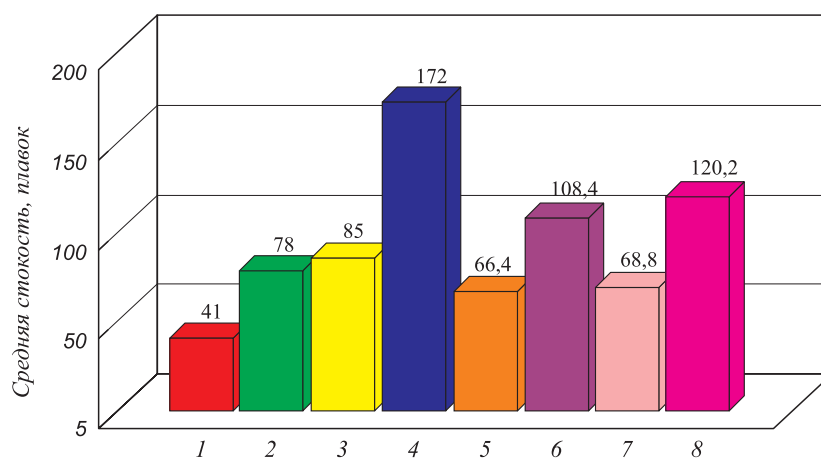


Рис. 3. Средняя стойкость сварных конструкций пятисопловых фурменных головок:

1, 5, 7 – штатной (различные периоды); 2, 3 – с уменьшенным расстоянием между чашами; 3 – без сварочных швов снаружи головки; 4 – с охлаждением засопловых зон; 6, 8 – «жестких» (ребра жесткости 3 и 5 мм соответственно)

Fig. 3. Average resistance of welded structures of 5-nozzle lance heads:

1, 5, 7 – standard (various periods); 2, 3 – with a reduced distance between the bowls; 3 – without welds outside the head; 4 – with cooling of the back from the nozzle zones; 6, 8 – “rigid” (stiffener plates – 3 and 5 mm, respectively)

⁴ В исследованиях на разных стадиях принимали участие: Несвет В.В., Учитель Л.М., Родь А.Г., Ивко В.В., Махлай Ю.П., Гребенюк Б.Ю., Кузьминых Б.Л., Мазай В.Г., Несвет К.В., Ситало А.А., Мощный В.В., Дерипаско В.А., Жидков А.П., Усенко О.Г., Волок В.А., Харченко Ю.И., Олиар В.Е., Сидорин Д.В., Кадацкий Л.В., Белошевский В.М., Соколов А.Н., Лосева Т.И., Женилов В.В., Галаганов А.С., Хрисанфов А.Н., Чаленко Ю.А.

– повышение жесткости сварной конструкции дутьевой головки (см. рис. 1, д) привели хоть и к положительным, но сравнительно невысоким результатам.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Полученные данные свидетельствуют о том, что сварочные швы, выполненные из меди вокруг сопловых вкладышей, которые удерживаются за счет этого в наконечнике (а также и в коллекторе) головки, являются тем лимитирующим звеном, которое не дает значительно поднять стойкость сварных конструкций фурменных устройств, от использования которых необходимо срочно отказаться.

Переход к использованию ковано-штампованных наконечников (вместе с ковано-штампованными коллекторами) в конструкциях фурменных головок или их цельнолитых конструкций [1 – 24] и применение описанных выше способов улучшения охлаждения и повышения «жесткости конструкции фурменной головки» позволит достичь более высокой стойкости таких головок к верхним продувочным фурмам, обладающих и так значительной стойкостью. При этом наружный сварочный шов из меди, соединяющий между собой стальное наружное переходное кольцо и медную нижнюю чашу (наконечник), необходимо будет разгружать от возникающих в конструкции фурменной головки при ее эксплуатации напряжений. Для этого используется дополнительное скрепление наконечника с наружным патрубком головки несколькими стальными штифтами [30].

Выводы

Поднять стойкость современных конструкций фурменных головок с ковано-штампованными наконечниками или цельнолитых конструкций фурменных головок [1 – 24], применяющихся в развитых металлургических странах мира, позволит совершенствование их систем охлаждения и увеличение «жесткости» конструкций по аналогии с разработанными [26, 28] и описанными в данной работе сварными конструкциями фурменных головок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Ming L. Rong Z. Research on coherent jet oxygen lance in BOF steelmaking process // *Metallurgical Research & Technology*. 2019. Vol. 116. No. 5. Article 502.
- Garajau F.S., Guerra M.de S.L., Maia B.T., Cetlin P.R. Effects of post combustion temperature on the wear of the supersonic nozzles in BOF lance tip // *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 96. P. 175 – 185.
- Maia B.T., Ribeiro A.R., Santos B.O. de A. etc. Continuous developments at the Steel Plant 1 Usiminas Ipatinga through slagless technology // *Iron and Steel Technology*. 2016. Vol. 13. No. 4. P. 61 – 64.
- Maia B.T., Imagawa R.K., Petrucelli A.C., Tavares R.P. Effect of blow parameters in the jet penetration by physical model of BOF converter // *Journal of Materials Research and Technology*. 2014. Vol. 3. No. 3. P. 244 – 256.
- Schlueter J., Kempken J., Odenthal H.-J. etc. Application of computational fluid dynamics to steelmaking processes // *Revue de Métallurgie*. 2008. Vol. 128. No. 10. P. 505 – 512.
- Garajau F.S., Cetlin P.R., Guerra M.de S.L. etc. Estudo de caso: desgaste nos bocais supersônicos do bico de lança da aciaria BOF. URL: file:///D:/Мои%20документы/Downloads/ESTUDO_DE_CASO_DESGASTE_NOS_BOCAIS_SUPERSONICOS_DO.pdf (дата обращения: 20.01.2020).
- Maia B.T., Garajau F.S., Barros J-E. M., Guerra M. de S.L. Desgaste em bocais de lança – simulações CFD e condições reais. URL: https://pdfs.semanticscholar.org/c40a/8aa2d6667b32d340285c94a079c7d64e1859.pdf (дата обращения: 20.01.2020).
- Oxygen Blowing Lance and Lance Tips in Converter Steel Making. URL: https://www.ispatguru.com/oxygen-blowing-lance-and-lance-tips-in-converter-steel-making/ (дата обращения: 13.01.2020).
- SAAR METALL Gruppe. URL: http://saarmetallgruppe.com/?page_id=50&lang=en (дата обращения: 13.01.2020).
- Impact GmbH. URL: http://www.impact-moers.de/product.htm (дата обращения: 20.01.2020).
- BOF – Basic Oxygen Furnace. URL: http://www.soudobeam.be/product/basic-oxygen-furnace/ (дата обращения: 13.01.2020).
- BOF. URL: http://tallmantechologies.ca/bof.php (дата обращения: 13.01.2020).
- Lance Tips & Burners. URL: http://www.nu-core.com/lfb.html (дата обращения: 10.02.2020).
- Lance Tips for Water-Cooled Oxygen Lance. URL: http://www.nagpalengineering.com/products/lance-tips-for-water-cooled-oxygen-lance/ (дата обращения: 13.01.2020).
- Made-in-China. Oxygen Lance and Lance Nozzle. URL: https://www.made-in-china.com/showroom/chongsheng/product-detaildoesbfVnEpS/China-Oxygen-Lance-And-Lance-Nozzle.html (дата обращения: 13.01.2020).
- Shandong Chongsheng Metallurgical Oxygen Lance Co., Ltd. URL: https://www.ecvv.com/product/4756904.html (дата обращения: 13.01.2020).
- AMK Metallurgical Machinery Group Co., Ltd. URL: https://amkgroup.en.ecplaza.net/products/oxygen-lance-tip_4431922 (дата обращения: 13.01.2020).
- Build Industrial Pakistan. URL: http://buildindustrialpakistan.blogspot.com/2014/01/water-cooled-oxygen-blowing-lance-vital.html (дата обращения: 13.01.2020).
- Calibration System for Oxygen-Blowing Lances. Available at URL: http://www.sms-siemag.com/download/H2_203E_Calibration_system_for_oxygen-blowing_lances_ES.pdf (дата обращения: 10.02.2020).
- Lance Tips and Sublances for Basic Oxygen Furnace (BOF), LD converters and other types. URL: http://fundicaoecusinagem.com/high-conductivity-copper-cooled-components-for-steel-industry/lance-tips-and-sublances-for-basic-oxygen-furnance-bof-lid-converters/ (дата обращения: 13.01.2020).
- Oxygen Lance Nozzle Assembly, used in Basic Oxygen Steel Making, 1970. URL: https://www.sspprints.com/image/83273/oxygen-lance-nozzle-assembly-used-in-basic-oxygen-steel-making-c-1970 (дата обращения: 13.01.2020).
- TradeKOREA. All Categories. URL: https://www.tradekorea.com/product/detail/P636834/Good-quality-Converter-Oxygen-Lance-Nozzle-for-water-cooled-.html (дата обращения: 13.01.2020).
- Oxygen Lance. URL: https://www.pinterest.com/lucysmail507/oxygen-lance/ (дата обращения: 20.01.2020).
- Soudotip. URL: http://www.soudobeam.be/en/product/basic-oxygen-furnace/soudotip/ (дата обращения: 20.01.2020).
- Чернятевич А.Г., Пантейков С.П., Учитель Л.М., Ивко В.В. Усовершенствование конструкций верхних фурм для большегрузных конвертеров // *Сталь*. 2000. № 2. С. 14 – 16.

26. Пат. 40296 UA, МПК7 С 21 С 5/48. Головка к верхней кислородной фурме с центральным подводом воды / С.П. Пантейков, В.В. Несвет, Л.М. Учитель и др.; заявл. 23.11.2000; опубл. 16.07.2001. Бюл. № 6.
27. Пантейков С.П., Несвет В.В., Учитель Л.М. и др. Совершенствование системы охлаждения фурменных головок конвертера // Сталь. 2013. № 8. С. 53 – 58.
28. Пат. 38980 UA, МПК7 С 21 С 5/48. Фурменная головка повышенной жесткости / С.П. Пантейков, Л.М. Учитель, В.В. Ивко и др.; заявл. 18.12.2000; опубл. 15.05.2001. Бюл. № 4.
29. Пантейков С.П., Учитель Л.М., Ивко В.В. и др. Повышение стойкости сварных фурменных головок 250-т конвертеров // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2003. № 6 (1242). С. 38 – 40.
30. Пантейков С.П., Махлай Ю.П., Пантейкова Е.С. и др. Разработка безопасных конструкций фурменных головок // Сталь. 2015. № 9. С. 15 – 17.

Поступила в редакцию 22 января 2020 г.

После доработки 12 февраля 2020 г.

Принята к публикации 16 октября 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. Vol. 63. No. 10, pp. 815–822.

DEVELOPMENT OF WELDED STRUCTURE OF 5-NOZZLE LANCE HEADS IN CONVERTER SHOP OF PJSC “DNEPROVSKY METALLURGICAL COMBINE”

S.P. Panteikov

Dniprovsk State Technical University, Kamenskoe, Dnipropetrovsk Region, Ukraine

Abstract. For the upper blasting lances of 250-tons oxygen converters at PJSC «DMC» (Kamenskoe, Ukraine) the author has proposed a number of welded structures of 5-nozzle lance heads with increased resistance. A set of industrial studies of their operation made it possible to establish that the devices which provide cooling of the areas back from the nozzle zone of the tip have the highest resistance. Measures to increase the values of the average cooler speeds in welded structures of the lance heads and their rigidity also turned out to be quite effective. The transfer of copper welds holding the nozzle inserts in the copper tip from its outer surface to the inner proved to be ineffective from the point of increasing resistance of the lance head (the average resistance of the heads increased by only 7 heats – from 78 to 85 heats). This allows us to assert the need for complete elimination of copper welds in the head (both external, exposed to high-temperature and mechanical stresses, and internal) that hold nozzle inserts in the holes of the welded tip and lance head collector. Thus, in spite of all the measures taken to transfer the welds from the outer surface of the tip to its inner surface, to improve cooling of the tip and its back from the nozzle zones, which also include sections of copper welds around the nozzles, as well as to increase the rigidity of the blast welded structure heads, this led, although to positive, but still to relatively low results. The data obtained indicate that welds made of copper around the nozzle inserts, which are held by this in the tip (also in the collector) of the head, are the limiting link that does not significantly increase the resistance of welded lance heads, and it is urgently necessary to back off its use.

Keywords: lance head, resistance, top lance, nozzle insert, tip, collector, weld.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-815-822

REFERENCES

1. Ming L. Rong Z. Research on coherent jet oxygen lance in BOF steelmaking process. *Metallurgical Research & Technology*. 2019, vol. 116, no. 5, article 502.
2. Garajau F.S., Guerra M. de S. L., Maia B.T., Cetlin P.R. Effects of post combustion temperature on the wear of the supersonic nozzles in BOF lance tip. *Engineering Failure Analysis*. 2019, vol. 96, pp. 175–185.
3. Maia B.T., Ribeiro A.R., Santos B.O. de A. etc. Continuous developments at the Steel Plant 1 Usiminas Ipatinga through slagless technology. *Iron and Steel Technology*. 2016, vol. 13, no. 4, pp. 61–64.
4. Maia B.T., Imagawa R.K., Petrucelli A.C., Tavares R.P. Effect of blow parameters in the jet penetration by physical model of BOF converter. *Journal of Materials Research and Technology*. 2014, vol. 3, no. 3, pp. 244–256.
5. Schlueter J., Kempken J., Odenthal H.-J. etc. Application of computational fluid dynamics to steelmaking processes. *Revue de Métallurgie*. 2008, vol. 128, no. 10, pp. 505–512.
6. Garajau F.S., Cetlin P.R., Guerra M. de S.L. etc. *Estudo de caso: desgaste nos bocais supersônicos do bico de lança da aciaria BOF*. Available at URL: file:///D:/Мои%20документы/Downloads/ESTUDO_DE_CASO_DESGASTE_NOS_BOCAIS_SUPERSONICOS_DO.pdf (Accessed 20.01.2020). (In Port.).
7. Maia B.T., Garajau F.S., Barros J-E. M., Guerra M. de S.L. *Desgaste em bocais de lança – simulações CFD e condições reais*. Available at URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/c40a/8aa2d6667b32d340285c94a079c7d64e1859.pdf> (Accessed 20.01.2020). (In Port.).
8. *Oxygen Blowing Lance and Lance Tips in Converter Steel Making*. Available at URL: <https://www.ispatguru.com/oxygen-blowing-lance-and-lance-tips-in-converter-steel-making/> (Accessed 13.01.2020).
9. *SAAR METALL Gruppe*. Available at URL: http://saarmetallgruppe.com/?page_id=50&lang=en (Accessed 13.01.2020).
10. *Impact GmbH*. Available at URL: <http://www.impact-moers.de/product.htm> (Accessed 20.01.2020).
11. *BOF – Basic Oxygen Furnace*. Available at URL: <http://www.soudbeam.be/product/basic-oxygen-furnace/> (Accessed 13.01.2020).
12. *BOF*. Available at URL: <http://tallmantechologies.ca/bof.php> (Accessed 13.01.2020).
13. *Lance Tips & Burners*. Available at URL: <http://www.nu-core.com/litb.html> (Accessed 10.02.2020).
14. *Lance Tips for Water-Cooled Oxygen Lance*. Available at URL: <http://www.nagpalengineering.com/products/lance-tips-for-water-cooled-oxygen-lance/> (Accessed 13.01.2020).
15. *Made-in-China. Oxygen Lance and Lance Nozzle*. Available at URL: <https://www.made-in-china.com/showroom/chongsheng/product-detaildoesbfVnEpS/China-Oxygen-Lance-And-Lance-Nozzle.html> (Accessed 13.01.2020).
16. *Shandong Chongsheng Metallurgical Oxygen Lance Co., Ltd*. Available at URL: <https://www.ecvv.com/product/4756904.html> (Accessed 13.01.2020).
17. *AMK Metallurgical Machinery Group Co., Ltd*. Available at URL: https://amkgroup.en.ecplaza.net/products/oxygen-lance-tip_4431922 (Accessed 13.01.2020).
18. *Build Industrial Pakistan*. Available at URL: <http://buildindustrialpakistan.blogspot.com/2014/01/water-cooled-oxygen-blowing-lance-vital.html> (Accessed 13.01.2020).
19. *Calibration System for Oxygen-Blowing Lances*. Available at URL: http://www.sms-siemag.com/download/H2_203E_Calibration_system_for_oxygen-blowing_lances_ES.pdf (Accessed 10.02.2020).
20. *Lance Tips and Sublances for Basic Oxygen Furnace (BOF), LD converters and other types*. Available at URL: <http://fundicaoousin->

- agem.com/high-conductivity-copper-cooled-components-for-steel-industry/lance-tips-and-sublances-for-basic-oxygen-furnance-bof-ld-converters/ (Accessed 13.01.2020).
21. *Oxygen Lance Nozzle Assembly, used in Basic Oxygen Steel-Making, 1970*. Available at URL: <https://www.ssplprints.com/image/83273/oxygen-lance-nozzle-assembly-used-in-basic-oxygen-steel-making-c-1970> (Accessed 13.01.2020).
22. *TradeKOREA. All Categories*. Available at URL: <https://www.tradekorea.com/product/detail/P636834/Good-quality-Converter-Oxygen-Lance-Nozzle-for-water-cooled.html> (Accessed 13.01.2020).
23. *Oxygen Lance*. Available at URL: <https://www.pinterest.com/lucys-mail507/oxygen-lance/> (Accessed 20.01.2020).
24. *Soudotip*. Available at URL: <http://www.soudobeam.be/en/product/basic-oxygen-furnace/soudotip/> (Accessed 20.01.2020).
25. Chernyatevich A.G., Panteikov S.P., Uchitel' L.M., Ivko V.V. Improving the design of upper lances for high-capacity converters. *Stal'*. 2000, no. 2, pp. 14–16. (In Russ.).
26. Panteikov S.P., Nesvet V.V., Uchitel' L.M. etc. *Golovka k verkhnei kislorodnoi furme s tsentral'nym podvodom vody* [Head to the top oxygen lance with a central water supply]. Patent UA no. 40296. MPK7 C21C 5/48. *Bulleten' izobretenii*. 2001, no. 6. (In Ukr.).
27. Panteikov S.P., Nesvet V.V., Uchitel' L.M. etc. Improving cooling system of lance heads of converter. *Stal'*. 2013, no. 8, pp. 53–58. (In Russ.).
28. Panteikov S.P., Uchitel' L.M., Ivko V.V. etc. *Furmennaya golovka povyshennoi zhestkosti* [High rigidity lance head]. Patent UA no. 38980. MPK7 C21C 5/48. *Bulleten' izobretenii*. 2001, no. 4. (In Ukr.).
29. Panteikov S.P., Uchitel' L.M., Ivko V.V. etc. Increased durability of welded lance heads of 250-t converters. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2003, no. 6 (1242), pp. 38–40. (In Russ.).
30. Panteikov S.P. Makhilai Yu.P., Panteikova E.S., Kadatskii L.V. Development of safe structures for lance heads. *Stal'*. 2015, no. 9, pp. 15–17. (In Russ.).

Information about the author:

S.P. Panteikov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy (ser_pant_in@ukr.net)

Received January 22, 2020
Revised February 12, 2020
Accepted October 16, 2020

УДК 662.8.057.24:621.74

ВЛИЯНИЕ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ НА КАЧЕСТВО ЛИТЕЙНОГО КОКСА

Побегалова Е.О., старший преподаватель (pobegalovaeo@gmail.com)
Иванова В.А., д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Технология материалов,
стандартизация и метрология» (ivanova-waleriya@mail.ru)

Ярославский государственный технический университет
(150023, Россия, Ярославль, Московский пр., 88)

Аннотация. Значения показателей качества литейного кокса определяют путем испытаний на коксохимических предприятиях. Потребители литейного кокса – предприятия литейного производства, как правило, находятся в отдалении от коксохимических предприятий. Транспортируют литейный кокс насыпью в открытых железнодорожных вагонах. В этой связи задачей данной работы является установление влияния транспортирования на качество литейного кокса. Для оценки влияния расстояния транспортирования был введен показатель разрушения P_t (%). Результаты экспериментальных исследований показали, что степень разрушения литейного кокса не одинакова на различных интервалах транспортирования. При транспортировании на расстояния до 300 км разрушению подвергается кокс с минимальным значением показателя прочности M_{40} . При увеличении расстояния транспортирования с 900 км до 2500 км показатель разрушения литейного кокса увеличивается на 2,08 – 3,02 % в зависимости от партии. Для всех партий наблюдалось образование класса крупности менее 40 мм в зависимости от значения показателя прочности M_{40} от 0,25 до 1,41 %. Для литейного кокса, характеризующегося большими значениями показателя прочности, при транспортировании сохраняется класс крупности 80 мм и более. При увеличении влажности окружающего воздуха в процессе транспортирования на 40 %, содержание влаги в образцах кокса крупности 40 – 60 мм увеличивается более, чем в 24 раза, класса крупности 60 – 80 мм – более, чем в 17 раз, класса крупности 80 мм и более – более, чем в 10 раз. При снижении влажности воздуха на 34 % количество влаги в грамме кокса класса крупности 40 – 60 мм уменьшается в 2 раза, в коксе класса крупности 60 – 80 мм – в 1,26 раза, в коксе класса крупности 80 мм и более – в 1,45 раза. По сравнению с коксом классов крупности 60 – 80 мм и 80 мм и более, влажность кокса класса крупности 40 – 60 мм растет с большей скоростью при увеличении влажности окружающего воздуха.

Ключевые слова: литейный кокс, качество, транспортирование, разрушение, влажность, показатели качества, класс крупности, испытания.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-823-828

ВВЕДЕНИЕ

Литейный кокс применяется для выплавки литейных чугунов в коксовых и коксогазовых вагранках. При этом к основным задачам литейного кокса относят обеспечение [1 – 3]:

- необходимого тепла для расплавления продуктов плавки;
- установленной температуры выплаваемого чугуна;
- дренажной способности столба шихты в шахте вагранки;
- нормируемого содержания углерода в чугуне.

Качество литейного кокса формируется при производстве, зависит от состава угольной шихты, технологии коксования [4 – 15] и определяется показателями, установленными ГОСТ 3340-88 [16]: массовая доля общей влаги в рабочем состоянии (W_t^r , %), зольность (A^d , %), массовая доля общей серы (S_t^d , %), показатель прочности (M_{40} , %), массовая доля кусков размером менее нижнего предела, в том числе менее 40 мм (%). Значения показателей качества зависят от марки и класса крупности литейного кокса [16] и определяются в условиях заводских испытательных лабораторий [17].

Значительная часть заводов литейного производства, на которых выплавляют литейные чугуны в вагранках, располагается в отдаленности от коксохимических предприятий. Транспортируют литейный кокс насыпью в открытых железнодорожных вагонах в соответствии с требованиями ГОСТ 22235-2010 [18], правилами перевозки грузов и техническими условиями погрузки и крепления грузов [16]. При этом значения показателей качества литейного кокса определяют путем испытаний на коксохимических предприятиях, а затем заносят в сопроводительные документы (сертификаты качества) для каждой партии (вагона) литейного кокса. В этой связи интерес представляет установление влияния транспортирования на качество литейного кокса.

С целью установления влияния условий транспортирования литейного кокса на его качество проведены испытания образцов литейного кокса различных партий (вагонов). Условия испытаний были максимально приближены к реальным условиям транспортирования литейного кокса. После испытаний определяли степень разрушения образцов литейного кокса путем оценки изменения крупности и массы образцов, а также изменения его влажности.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения степени разрушения при транспортировании было отобрано 45 образцов литейного кокса различной крупности из трех партий: 40 – 60 мм, 60 – 80 мм, 80 мм и более (табл. 1). Образцы партий 1/1 и 1/2 по данным сертификатов качества, выданных коксохимическими предприятиями, соответствовали требованиям ГОСТ 3340-88 [16], а партии 1/3 – ТУ 0761-032-00187852-2015 [19].

Испытания проводились на вибрационном электродинамическом стенде УВЭ-100/5-300, максимальная амплитуда виброускорения составляла 29,4 м/с² (3g), частота вибрации 30 Гц. Образцы литейного кокса каждой партии испытывались отдельно общей продолжительностью 1 ч 10 мин, что соответствует транспортировке по железной дороге на расстояние приблизительно 2100 км. До и после проведения испытания измеряли массу образцов и рассчитывали показатель разрушения литейного кокса при транспортировании P_T (%), позволяющий оценить степень разрушения литейного кокса

$$P_T = 100 \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1} \right), \%, \quad (1)$$

где m_1 – масса образца литейного кокса до испытаний, г;
 m_2 – масса образца литейного кокса после испытаний, г.

Измерения значений m_1 и m_2 содержат только систематическую составляющую погрешности, связанную со средством измерения, которая в соответствии с паспортом прибора составляет $\pm 0,01$ г. Значения показателя P_T определяли при проведении испытаний, соответствующих расстояниям транспортирования 300, 900, 1500 и 2100 км.

Результаты косвенных измерений показателя разрушения литейного кокса при транспортировании обрабатывались в соответствии с требованиями МИ 2083-90 [20]. Полученные значения погрешности косвенных измерений показателя P_T не превышали 0,014 %.

Для исследования влияния условий окружающей среды при транспортировании на влажность литейного кокса отбирали образцы классов крупности 40 – 60 мм, 60 – 80 мм, 80 мм и более пяти различных партий (табл. 2). Для имитации воздействия погодных условий при транспортировании в железнодорожном вагоне образцы литейного кокса помещали на открытый воздух. Во время эксперимента проводили измерение массы образцов и влажности воздуха, а также фиксировали динамику изменения влажности за день с использованием данных метеорологической службы.

После эксперимента образцы литейного кокса нагревали в муфельных печах модели СНОЛ 3/10 при температуре 200 °С до постоянной массы и определя-

Таблица 1

Показатели качества образцов литейного кокса для исследования влияния транспортирования на его разрушение

Table 1. Quality metrics of foundry coke samples to research the transportation impact on its destruction

Партия кокса	Массовая доля влаги, W_t^r , %	Зольность, A^d , %	Массовая доля серы, S_t^d , %	Прочность, M_{40} , %	Доля кусков размером менее нижнего предела, %	В том числе менее 40 мм, %
1/1	1,00	10,60	0,58	78,40	6,00	–
1/2	2,50	11,50	0,60	81,60	13,90	4,30
1/3	1,10	11,10	0,60	82,60	19,20	3,40

Таблица 2

Показатели качества образцов литейного кокса для исследования влияния условий окружающей среды на его влажность

Table 2. Quality metrics of foundry coke samples to research the environmental impact on moisture of foundry coke

Партия кокса	Массовая доля влаги, W_t^r , %	Зольность, A^d , %	Массовая доля серы, S_t^d , %	Прочность, M_{40} , %	Доля кусков менее 40 мм, %
2/1	4,5	11,7	0,4	73,3	5,9
2/2	4,8	11,6	0,6	73,8	5,8
2/3	4,8	11,8	0,5	73,3	5,9
2/4	4,9	11,3	0,5	76,8	6,0
2/5	4,8	12,0	0,5	73,2	5,9

ли количество влаги, приходящейся на 1 г литейного кокса по формуле

$$B = \frac{m_3 - m_4}{m_4}, \text{ г}, \quad (2)$$

где B – количество влаги в грамме литейного кокса, г; m_3 – масса образца литейного кокса до нагревания, г; m_4 – масса образца литейного кокса после нагревания, г.

Результаты косвенных измерений количества влаги в грамме литейного кокса образцов также обрабатывались в соответствии с требованиями МИ 2083-90 [20]. Полученные значения погрешности косвенных измерений количества влаги в грамме литейного кокса не превышали 0,002 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследований по определению степени разрушения литейного кокса при транспортировании 40 % образцов партии 1/1 и 20 % образцов партии 1/2 класса крупности 80 мм и более раскололись с образованием кусков класса крупности менее 40 мм после испытаний, соответствующих расстоянию транспортирования 300 км. При этом 20 % образцов литейного кокса класса 60 – 80 мм партии 1/3 раскололись также с образованием класса крупности менее 40 мм, а крупный кокс 80 мм и более сохранился при испытаниях. Влияние расстояния транспортирования литейного кокса на величину показателя разрушения представлено на рис. 1.

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что литейный кокс разрушается в процессе транспортирования, при этом степень разрушения зависит от качества кокса, которое формируется при производстве. В частности, при повышении прочности кокса (пар-

тия 1/3) его сопротивление разрушению при транспортировании увеличивается (см. рис. 1).

При транспортировании на расстояние до 300 км наибольшему разрушению подвергся кокс партии 1/1 с минимальным значением показателя прочности M_{40} (см. рис. 1, табл. 1). При увеличении расстояния транспортирования с 900 до 2500 км показатель разрушения увеличивается для всех партий на 2,08 – 3,02 %. При транспортировании на расстояние свыше 900 км значение показателя разрушения партии 1/2, характеризующейся максимальной зольностью (см. табл. 1), превышает значения показателей разрушения других партий на 0,23 – 1,65 %. Это может быть связано с тем, что включения золы в коксе являются дополнительными концентраторами внутренних напряжений, приводящими к разрушению литейного кокса [21].

Результаты исследований гранулометрического состава свидетельствуют о том, что для литейного кокса, характеризующегося большими значениями показателя прочности, при транспортировании сохраняется класс крупности 80 мм и более (табл. 3), который является предпочтительным для плавки чугуна в вагранке. При этом появление класса крупности литейного кокса менее 40 мм при транспортировании происходит за счет разрушения кокса классов крупности 80 мм и более, который характеризуется меньшей прочностью по сравнению с коксом класса крупности 40 – 60 мм из-за особенностей формирования коксового пирога при коксовании (табл. 4). Необходимо отметить, что в любом случае при транспортировании литейного кокса увеличивается количество класса крупности менее 40 мм, причем оно будет тем меньше, чем выше прочность кокса (табл. 1, партия 1/3). Прочность оставшегося крупного кокса будет выше, так как при транспортировании куски, содержащие трещины, будут разрушаться в первую очередь.

Результаты исследования влияния условий окружающей среды при транспортировании на влажность литейного кокса показали, что количество влаги в грамме литейного кокса увеличивается с ростом влажности окружающего воздуха в большей степени для кокса класса крупности 40 – 60 мм, в меньшей – для кокса крупности 60 – 80 мм и 80 мм и более (рис. 2). При увеличении влажности воздуха на 40 % (см. рис. 2), содержание влаги в образцах кокса крупности 40 – 60 мм увеличивается более, чем в 24 раза, класса крупности 60 – 80 мм – более, чем в 17 раз, класса крупности 80 мм и более – более, чем в 10 раз. При снижении влажности воздуха на 34 % количество влаги в грамме кокса класса крупности 40 – 60 мм уменьшилось в 2 раза, в коксе класса крупности 60 – 80 мм – в 1,26 раза, в коксе класса крупности 80 мм и более – в 1,45 раза. По сравнению с коксом классов крупности 60 – 80 мм и 80 мм и более, влажность кокса класса крупности 40 – 60 мм растет с большей скоростью при увеличении влажности окружающего воздуха (рис. 2) [22].

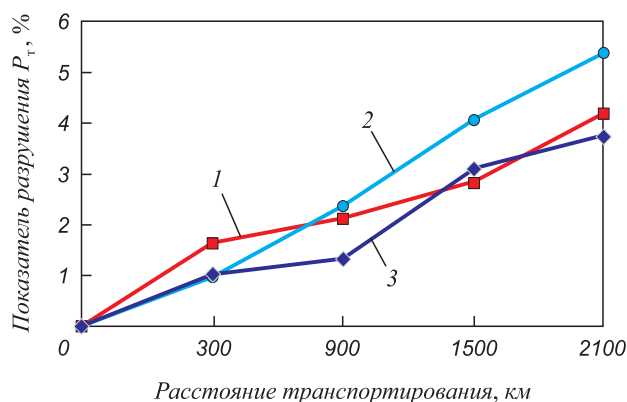


Рис. 1. Влияние расстояния транспортирования на показатель разрушения литейного кокса различных партий:
1 – 1/1; 2 – 1/2; 3 – 1/3

Fig. 1. Impact of transportation distance on the destruction index of foundry coke from different batches:
1 – 1/1; 2 – 1/2; 3 – 1/3

Таблица 3

Изменение содержания литейного кокса класса крупности 80 мм и более в зависимости от расстояния при транспортировании

Table 3. Difference in the composition of foundry coke of 80 mm and more size fraction depending on the transportation distance

Партия кокса	Расстояние транспортирования, км			
	300	900	1500	2100
	Содержание класса крупности 80 мм и более, %			
1/1	60,57	51,10	51,09	51,24
1/2	63,05	62,63	53,66	53,32
1/3	65,51	65,58	65,64	65,76

Таблица 4

Изменение содержания литейного кокса класса крупности менее 40 мм в зависимости от расстояния при транспортировании

Table 4. Difference in the composition of foundry coke of 40 mm and less size fraction depending on the transportation distance

Партия кокса	Расстояние транспортирования, км			
	300	900	1500	2100
	Содержание класса крупности 80 мм и более, %			
1/1	0	0	1,44	1,41
1/2	0,42	0,42	0,43	0,43
1/3	0,25	0,25	0,25	0,25

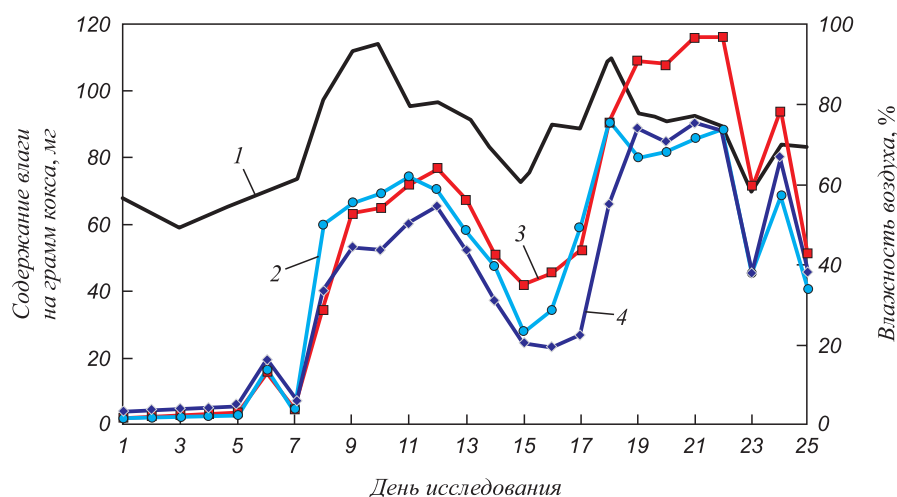


Рис. 2. Динамика изменения количества влаги в грамме литейного кокса в зависимости от влажности окружающего воздуха [21]: 1 – влажность воздуха; 2 – класс крупности 40 – 60 мм; 3 – класс крупности 60 – 80 мм; 4 – класс крупности 80 мм и более

Fig. 2. Dynamics of moisture changes in a gram of foundry coke depending on humidity of the surrounding air [21]: 1 – air humidity; 2 – size fraction 40 – 60 mm; 3 – size fraction 60 – 80 mm; 4 – size fraction 80 mm and more

Содержание влаги, приходящейся на 1 г литейного кокса, резко возрастает при увеличении влажности окружающей среды, при этом уменьшение содержания влаги в литейном коксе в связи с понижением влажности окружающей среды происходит значительно медленнее.

Выводы

При транспортировании на расстояния свыше 1500 км увеличивается количество класса крупности литейного кокса менее 40 мм на 0,25 – 1,44 %, причем с повышением прочности кокса (M_{40} , %) содержание класса крупности менее 40 мм уменьшается.

При транспортировании на расстояния свыше 1500 км уменьшается количество кокса класса крупности 80 мм и более на 9,39 – 9,48 %, при этом с повышением прочности кокса (M_{40} , %) количество крупного

кокса, разрушаемого при транспортировании, уменьшается.

При увеличении расстояния транспортирования с 900 км до 2500 км интенсивность разрушения литейного кокса возрастает, значение показателя разрушения (P_T) увеличивается на 2,08 – 3,02 % в зависимости от партии.

При транспортировании литейного кокса в открытых вагонах с увеличением влажности окружающего воздуха на 40 % содержание влаги в образцах кокса крупности 40 – 60 мм увеличивается более, чем в 24 раза, класса крупности 60 – 80 мм – более, чем в 17 раз, класса крупности 80 мм и более – более, чем в 10 раз.

Таким образом, качество литейного кокса при транспортировании ухудшается, так как уменьшается количество крупного кокса и увеличивается количество мелочи. Кроме того, влажность литейного кокса

при транспортировании увеличивается с повышением влажности окружающей среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Липницкий А.М. Плавка чугуна и сплавов цветных металлов. – Л.: Машиностроение, 1973. – 192 с.
2. Неведов П.Я., Страхов В.М. Качество и эффективность использования литейного кокса в вагранках // Кокс и химия. 2003. № 7. С. 16 – 26.
3. Матюхин В.И., Матюхина А.В., Бабанин В.Б. и др. Выбор потребительских свойств металлургического кокса для обеспечения эффективности ваграночной плавки // Кокс и химия. 2015. № 3. С. 20 – 25.
4. Долинский В.А., Гайниев Г.Р., Никитин Л.Д. Влияние состава и свойств угольной шихты на качество кокса // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. Т. 53. № 2. С. 14 – 16.
5. North L., Blackmore K., Nesbitt K., Mahoney M.R. Methods of coke quality prediction: A review // Fuel. 2018. Vol. 219. P. 426 – 445.
6. Zhang Q., Wu X., Feng A., Shi M. Prediction of coke quality at Baosteel // Fuel Processing Technology. 2004. Vol. 86. No. 1. P. 1 – 11.
7. Kishore G.S., Jagannadham G., Alma S. Coal blend modeling and coke quality prediction studies – GIKIL's success story // Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference: 2 – 5 May 2011, Indianapolis, Indiana, USA. AIST, Association for Iron & Steel Technology. Ronald E. Ashburn, publ. 2011. Vol. 1. P. 207 – 216.
8. Tiwari H.P., Haldar S.K., Roy A. etc. Data mining – new perspectives on predicting coke quality in recovery stamp charged coke making process // Metallurgical Research & Technology. 2015. Vol. 112. No. 6. P. 603 – 618.
9. Koszorek A., Krzesińska M., Pusz S. etc. Relationship between the technical parameters of cokes produced from blends of three Polish coals of different coking ability // Int. Journal of Coal Geology. 2009. Vol. 77. No. 3 – 4. P. 363 – 371.
10. Lorez D., Sanada Y., Mondragon F. Effect to low-temperature oxidation of coal on hydrogen-transfer capability // Fuel. 1998. Vol. 77. No. 14. P. 1623 – 1628.
11. Sanchez J.E., Rincon J.M. Oxidation paths of a coking coal and comparison of its oxidized product with a non-coking coal // Fuel. 1997. Vol. 76. No. 12. P. 1137 – 1142.
12. Smędowski Ł., Piechaczek M. Impact of weathering on coal properties and evolution of coke quality described by optical and mechanical parameters // Int. Journal of Coal Geology. 2016. Vol. 168. Part.1. P. 119 – 130.
13. Nyathi M.S., Kruse R., Mastalerz M., Bish D.L. Nature and origin of coke quality variation in heat-recovery coke making technology // Fuel. 2016. Vol. 176. P. 11 – 19.
14. Montiano M.G., Diaz-Faes E., Barriocanal C. Effect of briquette composition and size on the quality of the resulting coke // Fuel Processing Technology. 2016. Vol. 148. P. 155 – 162.
15. Montiano M.G., Diaz-Faes E., Barriocanal C., Alvarez R. Influence of biomass on metallurgical coke quality // Fuel. 2014. Vol. 116. P. 175 – 182.
16. ГОСТ 3340-88. Кокс литейный каменноугольный. Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 4 с.
17. Иванова В.А., Яблонский О.П. Особенности подготовки документации для аккредитации заводских испытательных лабораторий в области контроля качества литейного кокса // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. № 6. С. 66 – 70.
18. ГОСТ 22235-2010. Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневренных работ. – М.: Стандартиформ, 2011. – 18 с.
19. ТУ 0761-032-00187852-2015. Кокс литейный каменноугольный. Технические условия. 2015. – 13 с.
20. МИ 2083-90 ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 10 с.
21. Иванова В.А., Вдовин К.Н. Метод испытания для определения истираемости и абразивной способности литейного кокса // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 3. С. 149 – 153.
22. Иванова В.А., Шамина Е.О. Влияние влажности окружающей среды на влажность литейного кокса // Химия твердого топлива. 2018. № 6. С. 46 – 50.

Поступила в редакцию 9 декабря 2019 г.

После доработки 16 декабря 2019 г.

Принята к публикации 16 октября 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 10, pp. 823–828.

IMPACT OF TRANSPORTATION ON FOUNDRY COKE QUALITY

E.O. Pobegalova, V.A. Ivanova

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia

Abstract. The quality metrics of foundry coke are determined by testing at coke plants. Foundry coke consumers are foundry enterprises which are usually located far from the coke plants. Foundry coke is transported in bulk in open railway wagons. Therefore, this paper is aimed to determine the impact of transportation on the quality of foundry coke. The test conditions were as close as possible to real life conditions of foundry coke transportation. To estimate the impact of transportation distance we introduced the destruction index P_T (%). The results of experimental studies have shown that the destruction of foundry coke is not the same at different intervals of transportation. When transporting up to 300 km, the coke with the minimum durability index M_{40} is destroyed. When the distance is increased from 900 km up to 2500 km, the foundry coke destruction index (P_T , %) increases by 2.08 – 3.02 % depending on the batch. For all batches, a size fraction of less than 40 mm was noted depending on the durability index M_{40} from 0.25 to 1.41 %. The size fraction of more than 80 mm stays the same for foundry coke with higher durability indices. When the air humidity rises by 40 % during transportation, the amount of moisture in the coke

samples of a 40 – 60 mm size fraction is more than 24 times higher than usual, a 60 – 80 mm size fraction – more than 17 times, an 80 mm and larger – more than 10 times. When the air humidity decreases by 34 %, the amount of moisture in a gram of coke of a 40 – 60 mm size fraction becomes 2 times lower than usual, a 60 – 80 mm size fraction – 1.26 times, an 80 mm and larger – 1.45 times. Compared to coke of size fractions 60 – 80 mm and 80 mm and larger, the moisture of the 40 – 60 mm size fraction coke grows faster when the air humidity increases as well.

Keywords: foundry coke, quality, transportation, destruction, moisture, quality metrics, size fraction, tests.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-823-828

REFERENCES

1. Lipnitskii A.M. *Plavka chuguna i spлавov tsvetnykh metallov* [Melting of Cast Iron and Non-Ferrous Alloys]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1973, 192 p. (In Russ.).
2. Nefedov P.Ya., Strakhov V.M. Quality and efficiency of utilization of foundry coke in cupola. *Koks i khimiya*. 2003, no. 7, pp. 16–26. (In Russ.).

3. Matyukhin V.I., Matyukhina A.V., Babanin V.B., Zorin M.V., Stakheev S.G. Selecting the properties of metallurgical coke for cupola furnaces. *Coke and Chemistry*. 2015, vol. 58, no. 3, pp. 96–100.
4. Dolinskii V.A., Gainieva G.R., Nikitin L.D. Coal charge composition and properties impact on coke quality. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, vol. 53, no. 2, pp. 14–16. (In Russ.).
5. North L., Blackmore K., Nesbitt K., Mahoney M.R. Methods of coke quality prediction: A review. *Fuel*. 2018, vol. 219, pp. 426–445.
6. Zhang Q., Wu X., Feng A., Shi M. Prediction of coke quality at Baosteel. *Fuel Processing Technology*. 2004, vol. 86, no. 1, pp. 1–11.
7. Kishore G.S., Jagannadham G., Alma S. Coal blend modeling and coke quality prediction studies - GIKIL's success story. *Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference: 2 – 5 May 2011, Indianapolis, Indiana, USA*. AIST, Association for Iron & Steel Technology. Ronald E. Ashburn, publ. 2011, vol. 1, pp. 207–216.
8. Tiwari H.P., Haldar S.K., Roy A., Bhattacharjee A., Mishra P. Data mining – new perspectives on predicting coke quality in recovery stamp charged coke making process. *Metallurgical Research & Technology*. 2015, vol. 112, no. 6, pp. 603–618.
9. Koszorek A., Krzesińska M., Pusz S., Pilawa B., Kwiecińska B. Relationship between the technical parameters of cokes produced from blends of three Polish coals of different coking ability. *Int. Journal of Coal Geology*. 2009, vol. 77, no. 3–4, pp. 363–371.
10. Lorez D., Sanada Y., Mondragon F. Effect to low-temperature oxidation of coal on hydrogen-transfer capability. *Fuel*. 1998, vol. 77, no. 14, pp. 1623–1628.
11. Sanchez J.E., Rincon J.M. Oxidation paths of a coking coal and comparison of its oxidized product with a non-coking coal. *Fuel*. 1997, vol. 76, no. 12, pp. 1137–1142.
12. Smędowski Ł., Piechaczek M. Impact of weathering on coal properties and evolution of coke quality described by optical and mechanical parameters. *Int. Journal of Coal Geology*. 2016, vol. 168, part 1, pp. 119–130.
13. Nyathi M.S., Kruse R., Mastalerz M., Bish D.L. Nature and origin of coke quality variation in heat-recovery coke making technology. *Fuel*. 2016, vol. 176, pp. 11–19.
14. Montiano M.G., Diaz-Faes E., Barriocanal C. Effect of briquette composition and size on the quality of the resulting coke. *Fuel Processing Technology*. 2016, vol. 148, pp. 155–162.
15. Montiano M.G., Diaz-Faes E., Barriocanal C., Alvarez R. Influence of biomass on metallurgical coke quality. *Fuel*. 2014, vol. 116, pp. 175–182.
16. GOST 3340-88. *Koks liteinyi kamennougol'nyi. Tekhnicheskie usloviya* [Foundry coal coke. Technical conditions]. Moscow: Izd-vo standartov, 1989, 4 p. (In Russ.).
17. Ivanova V.A., Yablonskii O.P. Preparation of accreditation documents of factory testing laboratories in the field of quality control of foundry coke. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2013, no. 6, pp. 66–70. (In Russ.).
18. GOST 22235-2010. *Vagony gruzovye magistral'nykh zheleznykh dorog kolei 1520 mm. Obshchie trebovaniya po obespecheniyu sokhrannosti pri proizvodstve pogruzochno-razgruzochnykh i manevrennykh rabot* [Freight wagons of the main railway expensive gauge 1520 mm. General requirements for ensuring safety during handling and maneuvering operations]. Moscow: Standartinform, 2011, 18 p. (In Russ.).
19. TU 0761-032-00187852-2015. *Koks liteinyi kamennougol'nyi. Tekhnicheskie usloviya* [Foundry coal coke. Technical conditions]. 2015, 13 p. (In Russ.).
20. MI 2083-90 GSI. *Izmereniya kosvennye. Opredelenie rezul'tatov izmerenii i otsenivanie ikh pogreshnostei* [Indirect measurements. Determination of measurement results and evaluation of their errors]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1991, 10 p. (In Russ.).
21. Ivanova V.A., Vdovin K.N. Test method for the determination of abrasion strength and abrasive ability of foundry coke. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 3, pp. 149–153. (In Russ.).
22. Ivanova V.A., Shamina E.O. Influence of environmental humidity on humidity of foundry coke. *Khimiya tverdogo topliva*. 2018, no. 6, pp. 46–50. (In Russ.).

Information about the authors:

E.O. Pobegalova, Senior Lecturer (pobegalovaeo@gmail.com)
V.A. Ivanova, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor; Head of the Chair
 “Materials Technology, Standardization, and Metrology”
 (ivanova-waleriya@mail.ru)

Received December 9, 2019
 Revised December 16, 2019
 Accepted October 20, 2020

УДК 621.742.08

ИЗМЕНЕНИЕ ПОДАТЛИВОСТИ СЫРОЙ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТОЙ ФОРМЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОТЛИВКИ

Колокольцев В.М., д.т.н., профессор, президент ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» (kwm@magtu.ru)

Савинов А.С., д.т.н., доцент, директор Института металлургии, машиностроения и материалов обработки (savinov_nis@mail.ru)

Феоктистов Н.А., к.т.н., заведующий кафедрой литейных процессов и материаловедения (fna87@mail.ru)

Постникова А.С., старший преподаватель кафедры механики (a-tus@mail.ru)

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»
(455000, Россия, Челябинская обл., Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

Аннотация. Одним из путей повышения экономической эффективности работы литейного предприятия является снижение себестоимости изделия за счет уменьшения брака, весомая доля которого образуется ввиду возникновения горячих и холодных трещин в процессе затвердевания и охлаждения в системе «отливка – форма». Образование трещин происходит из-за силового взаимодействия отливки с формой. В настоящее время используется ряд подходов к определению величины напряженного состояния в материале отливки и, соответственно, определению величины силового взаимодействия. В работе рассматривается разработанная оценка напряженно-деформированного состояния системы «отливка – форма», которое определяется по сопротивлению деформации формовочной смеси. Изменение сопротивления деформации формовочной смеси носит сложный характер ввиду многофакторности процесса взаимосвязи возникающих напряжений с тепловым и компонентным составом слоя песчано-глинистой формы. В работе исследовалось влияние геометрических параметров и теплофизических свойств отливки на сопротивление деформации формовочной смеси. Разработана математическая модель, учитывающая теплопередачу между отливкой и формой, нарастание сухого слоя формы и миграцию влаги в слое песчано-глинистой смеси. На основе математического моделирования проведен количественный анализ влияния теплофизических свойств отливки: теплопроводности, объемной теплоемкости, теплоты кристаллизации, а также геометрических параметров в виде толщины стенки отливки на податливость сырой песчано-глинистой формовочной формы влажностью 5 %, выраженной через среднее сопротивление деформации под элементом затруднения длиной 100 мм. Установлено, что исследование изменения вышеперечисленных факторов в сторону увеличения в фиксированный момент времени повышает среднее значение сопротивления деформации. Показана количественная взаимосвязь выделившегося тепла с ростом сухого слоя формовочной смеси. Отмечено, что динамика изменения средней температуры не всегда совпадает с ростом сопротивления деформации формовочной смеси.

Ключевые слова: сопротивление деформации, геометрические параметры, теплофизические свойства, податливость, теплота кристаллизации, система «отливка – форма», теплопроводность, песчано-глинистая форма.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-829-835

ВВЕДЕНИЕ

Повышение конкурентоспособности литейного предприятия напрямую связано с уменьшением себестоимости выпускаемой продукции. В связи с существенными энергетическими и материальными затратами, снижение себестоимости отливок может осуществляться путем уменьшения доли брака выпускаемой продукции. Следует отметить, что при изготовлении фасонной отливки существенная доля брака приходится на брак по холодным и горячим трещинам вследствие силового взаимодействия отливки с формой.

В настоящее время в практике литейного производства оценка возможности образования такого дефекта преимущественно осуществляется по трем направлениям:

- Критериальная оценка, описывающая влияние механических свойств материала отливки на сопротивление возникновению критических напряжений, приводящих к нарушению сплошности в теле отливки. В данном направлении работали: А.А. Бочвар, Н.И. Прохоров, К.Н. Вдовин, Г.Ф. Баландин, Л.П. Каширцев, С.И. Рыбачук и др. [1 – 6].

- Оценка напряженного состояния по технологическим литейным пробам. Этим направлением занимались: Н.Ф. Hall, J. Middleton, Л.А. Аксенов, П.Н. Щегловитов, В.Л. Шагалов, А.И. Евстигнеев, Б.А. Кулаков и др. [7 – 13].

- Математическая оценка силового взаимодействия отливки и формы (Б.Б. Гуляев, Г.Ф. Баландин, Ю.А. Степанов, А.П. Трухов, Л.С. Константинов, Ю.С. Гомельский, В.В. Десницкий и др.) [14 – 20].

Одним из косвенных критериев оценки напряженно-деформированного состояния системы «отливка – форма» может являться сопротивление деформации формовочной смеси (рис. 1). Сопротивление деформации характеризует податливость исследуемого материала. Это величина удельного сопротивления, необходимая для деформации тела. Сопротивление деформации выражается в величине возникающих напряжений в зависимости от относительного изменения размеров исследуемого объекта при одноосном напряженном состоянии [21, 22]. Это соответствует определению податливости формовочной смеси, как способности формовочных материалов сокращаться в объеме под действием усадки отливки. Таким образом, количественная оценка податливости слоя формовочной смеси под элементом затруднения может быть оценена как среднее значение напряжений в формовочной смеси, возникающих при деформации сжатия (рис. 2).

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n}, \quad (1)$$

где σ_i – напряжение в i -ом слое формовочной смеси; n – количество слоев, на которые разбита система.

Изменение сопротивления деформации формовочной смеси носит сложный характер ввиду многофакторности процесса взаимосвязи возникающих напряжений с тепловым и компонентным составом слоя песчано-глинистой формы (ПГФ). Нарастание сухого слоя формы, температурная деструкция связующего, миграция влаги в слое песчано-глинистой смеси (ПГС) – все это значительным образом сказывается на силовом взаимодействии отливки с формой. При этом следует отметить, что на физическое состояние слоя и, как следствие, на его сопротивление деформации значительным образом

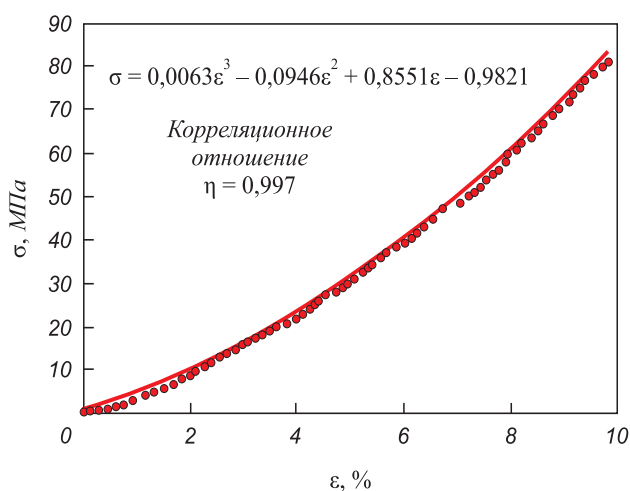


Рис. 1. График зависимости нормальных напряжений в формовочной сухой смеси от деформации при комнатной температуре

Fig. 1. Dependence of normal stresses in the molding dry mixture on deformation at room temperature

влияют геометрические и теплофизические параметры самой отливки. Поэтому установление взаимосвязи геометрии и теплофизических свойств материала отливки с податливостью слоя сырой формовочной смеси, выраженной через сопротивление деформации слоя ПГС, позволит проводить оперативную оценку силового взаимодействия литой заготовки с формой в зависимости от материала отливки [23, 24].

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрена задача о тепловом взаимодействии плоской стенки отливки с сырой песчано-глинистой литейной формой. Плотность формы принимали 1600 кг/м^3 , влажность 5 %, количество связующего (каолиновой глины) 5 %. Сопротивление деформации определяли под элементом затруднения длиной 100 мм, расчеты производили при относительной деформации слоя 3 %.

Определение теплового взаимодействия отливки с формой осуществляли путем численного решения задачи теплопроводности методом конечных разностей [25, 26]. Для учета теплоты кристаллизации использовали функцию эквивалентной теплоемкости [27]

$$C_{\text{экв}}^{\text{Me}} = (C_{\text{Me}} + C_{\text{доб}}^{\text{Me}}) \rho_{\text{Me}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{экв}}^{\text{Me}}$ – объемная функция эквивалентной теплоемкости металла, используемая в разностных схемах, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{м}^3)$; C_{Me} – температурная зависимость удельной теплоемкости, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; $C_{\text{доб}}^{\text{Me}}$ – добавочное значение теплоемкости металла на температурном отрезке $(T_{\text{ликв}} - T_{\text{сол}})$, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ_{Me} – плотность металла, кг/м^3 .

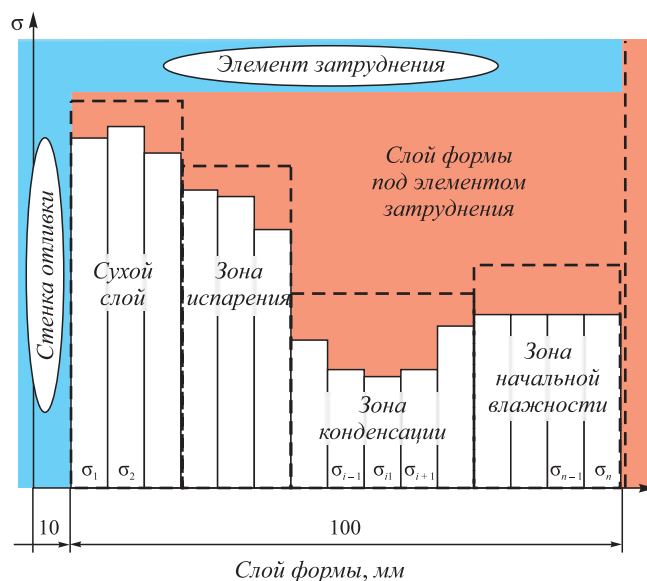


Рис. 2. Схема к расчету сопротивления деформации формовочной смеси

Fig. 2. Scheme to the calculation of deformation resistance of the molding mixture

$$C_{\text{доб}}^{\text{Ме}} = \frac{\omega e^{\frac{(T_{\text{лик}}^n - T_{\text{сол}})^2}{2}}}{0,337(T_{\text{лик}} - T_{\text{сол}})}, \quad (3)$$

$$2,5 \leq (T_{\text{лик}} - T_{\text{сол}}) \leq 333,$$

где $T_{\text{лик}}$, $T_{\text{сол}}$ – температуры ликвидус и солидус сплава соответственно, °C; ω – теплота кристаллизации сплава, Дж/кг.

Для учета тепла, потраченного на испарение влаги в формовочной смеси, использовали следующую зависимость [28]:

$$C_{\text{эвб}}^{\text{Ф}} = \left[952,5 + 184,33(T_i^n + 273)10^{-3} \right] \rho_{\text{сух}} + 15,431 \cdot 10^3 U_0 \rho_{\text{формы}} e^{-1,11(T_i^n - 97,5)}, \quad \begin{cases} U_0 = 0; \\ 2 \leq U_0 \leq 10. \end{cases} \quad (4)$$

где $C_{\text{эвб}}^{\text{Ф}}$ – объемная функция эквивалентной теплоемкости формовочной смеси, используемая в разностных схемах, Дж/(кг·м³); T_i^n – температура i -го слоя формовочной смеси при применении МКР, °C; $\rho_{\text{формы}}$, $\rho_{\text{сух}}$ – начальная плотность формы и плотность сухого слоя смеси при полном испарении влажности, кг/м³.

Для оценки теплового взаимодействия отливки с формой использовали граничное условие 4-го рода,

с окружающей средой – граничное условие 3-го рода, для определения коэффициента теплоотдачи применяли уравнение Стефана – Больцмана [29 – 32].

Определение сопротивления деформации осуществлялось по алгоритму, детально описанному в работах [33 – 35]. Начальная температура отливки принималась 1250 °C, температура окружающей среды 20 °C, теплопроводность 47 Вт/(м·град), теплоемкость 500 Дж/(кг·°C), толщина стенки отливки 10 мм. При анализе нарастания сухого слоя в форме условием отсутствия влаги принималась температура смеси не менее 100 °C. В ходе теоретического исследования сопротивление деформации определялось на 180-й секунде от начала теплового взаимодействия.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе проводимой работы один из рассматриваемых параметров варьировался, остальные оставались неизменными. Рассмотрим изменение сопротивления деформации при варьировании геометрических параметров, выраженных толщиной стенки отливки (рис. 3, а). При проведении данного исследования теплота кристаллизации принималась равной нулю. Количество тепла, отданное стенкой отливки, определялось как [36 – 39]

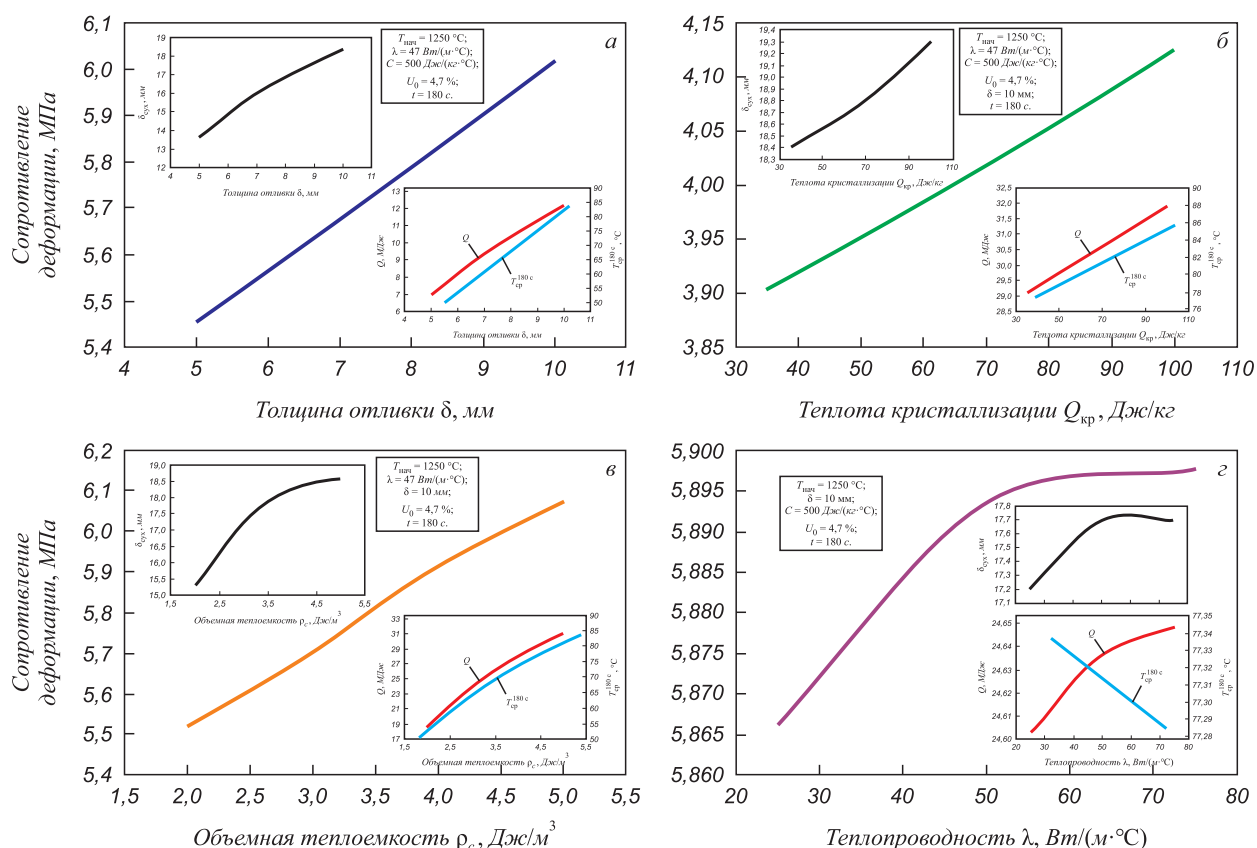


Рис. 3. Влияние геометрии и теплофизических свойств стенки отливки на сопротивление деформации формовочной смеси

Fig. 3. Influence of geometry and thermophysical properties of the casting wall on deformation resistance of the molding mixture

$$Q = mc(T_{\text{нач}} - T_{\text{ср}}^{180}), \quad (5)$$

где m – масса отливки, кг; c – теплоемкость, Дж/(кг·°C); $T_{\text{нач}}$ – начальная температура отливки, °C; $T_{\text{ср}}^{180}$ – средняя температура охлаждения в форме ($t = 180$ с).

При расчете определялось тепло, отданное с одного квадратного метра стенки отливки. При вычислении теплоотдачи масса стенки отливки изменялась в соответствии с изменением толщины δ . Результаты расчета представлены на рис. 3, а.

Как видно из приведенных графиков, увеличение толщины стенки отливки приводит к повышению сопротивления деформации слоя формовочной смеси. Это связано с ростом величины сухого слоя формовочной смеси под элементом затруднения, имеющего высокие механические свойства, что определяется увеличением количества тепла, отданного отливкой в фиксированный момент времени (рис. 3, а).

Следует отметить, что повышение сопротивления деформации формовочной смеси при увеличении толщины стенки отливки оказывает неоднозначное влияние на напряженно-деформированное состояние стенки литой заготовки. Необходимо учесть, что увеличение δ приводит к значительному снижению возникающих напряжений по сечению отливки, поэтому для точного понимания процесса силового взаимодействия отливки с формой требуется учет пластических, прочностных и механических свойств материала литой заготовки.

Анализ влияния теплоты кристаллизации на податливость слоя ПГФ осуществлялся с использованием следующего выражения:

$$Q = mc(T_{\text{нач}} - T_{\text{ср}}^{180}) + mQ_{\text{кр}}, \quad (6)$$

где $Q_{\text{кр}}$ – удельная теплота кристаллизации, Дж/(кг·°C).

Результаты расчетов представлены на рис. 3, б. Повышение теплоты кристаллизации увеличивает количество тепла, отданное стенкой отливки в исследуемый период времени, что приводит к увеличению сухого слоя формы и, как следствие, к повышению сопротивления деформации слоя формовочной смеси в целом. Следует отметить, что увеличение теплоты кристаллизации приводит к более длительному затвердеванию стенки отливки. Как следствие, сопротивление деформации формы с увеличением теплоты кристаллизации при прочих равных условиях (схожая теплопроводность, теплоемкость, плотность и др.) должно значительно влиять на напряженно-деформированное состояние затвердевающей корки стенки отливки. При длительном затвердевании и повышенном сопротивлении деформации напряжения в затвердевающей корке значительно выше, нежели в более толстой корке. Как следствие, вероятность возникновения критического состояния, приводящего к горячим трещинам в стенке отливки, более высока.

Значительное влияние на сопротивление деформации формовочной смеси оказывает объемная теплоемкость материала стенки отливки, варьирование которой может быть осуществлено как через плотность материала, так и через его удельную теплоемкость. Очевидно, что по окончании исследуемого периода времени увеличение объемной теплоемкости приводит к увеличению средней температуры по толщине стенки отливки. Тепло, отданное отливкой, рассчитанное по выражению (5), коррелирует с ростом сухого слоя формовочной смеси и, как следствие, с его сопротивлением деформации (рис. 3, в). Следует отметить, что увеличение объемной теплоемкости и связанное с ним повышение средней температуры стенки отливки может играть как положительную, так и отрицательную роль. Увеличение средней температуры показывает, что рост усадочной деформации может идти в зоне с повышенными пластическими свойствами материала. Как следствие, уменьшение податливости формовочной смеси значительной роли играть не будет. Однако при рассмотрении влияния роста сопротивления деформации во время нахождения отливки в температурном интервале хрупкости при низких пластических и прочностных свойствах материала, сопротивление деформации может оказать значительную роль в образовании критических напряжений, приводящих к нарушению сплошности в теле отливки.

При анализе влияния теплопроводности стенки отливки на сопротивление деформации смеси (рис. 3, г) следует отметить, что, несмотря на снижение средней температуры с увеличением теплопроводности материала литой заготовки количество тепла, отданное отливкой, рассчитанное по выражению (5), возрастает (рис. 3, г). Происходит нарастание сухого слоя и, как следствие, рост сопротивления деформации формовочной смеси. Однако следует отметить, что, несмотря на выявленную зависимость возрастания сопротивления деформации смеси с увеличением теплопроводности материала отливки происходит уменьшение средней температуры стенки отливки. Это говорит о достаточно динамичном наборе прочности материала при одновременном уменьшении его пластических свойств. Как следствие, несмотря на рост напряжений в стенке отливки, связанный как с ростом сопротивления деформации формовочной смеси, так и с увеличением модуля продольной упругости, критического состояния материал отливки может не достичь вследствие повышения временного сопротивления разрыву материала литой заготовки.

Выводы

Таким образом, проведенный анализ позволил оценить влияние теплофизических и геометрических свойств стенки отливки на податливость сырой формовочной смеси, выраженной через ее сопротивление деформации. Следует отметить, что полученные дан-

ные могут быть направлены лишь на косвенную оценку напряженного состояния литого изделия. Количественное определение критических напряжений, приводящих к нарушению сплошности в теле литой заготовки, возможно лишь на основе анализа всех факторов, влияющих на силовое взаимодействие отливки с формой (теплофизические, механические, геометрические и другие параметры системы «отливка – форма»). Проведенная работа дает понимание о влиянии геометрии и теплофизических свойств отливки на прочностные и деформационные характеристики формовочной смеси при ее теплом взаимодействии со стенкой отливки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Бочвар А.А., Рыкалин Н.Н., Прохоров И.И. и др. К вопросу о горячих кристаллизационных трещинах при литье и сварке // Литейное производство. 1960. № 10. С. 47.
- Madhukar Vable. *Mechanics of Materials*. 2nd ed. – Michigan Technological University, 2014. – 595 с.
- Бочвар А.А., Сви́дская З.А. О разрушении отливок под действием усадочных напряжений в период кристаллизации в зависимости от состава // Изв. АН СССР, ОТН. 1947. № 3. С. 349 – 354.
- Davidson C., Viano D., Lu L., St. John D. Observation of crack initiation during hot tearing // *Int. Journal of Cast Metals Research*. 2006. Vol. 19. No. 1. P. 59 – 65.
- Hardin R., Choi K.K., Beckermann C. Reliability-based casting process design optimization // *Int. Journal of Cast Metals Research*. 2015. Vol. 28. No. 3. P. 181 – 192.
- Баландин Г.Ф., Гини Э.И., Матвиенко Ю.П. и др. Технологическая проба для борьбы с горячими трещинами в панельных отливках // Изв. вуз. Машиностроение. 1964. № 1. С. 198 – 203.
- Lü M., Lu B., Wang X.-X. etc. Research and control on web plate crack of the large type beam blank // *Iron and Steel (Peking)*. 2010. Vol. 45. No. 7. P. 99 – 102.
- Liu J.-H., Bao Y.-P., Sun W. etc. Genetic analysis of surface cracks in H beam // *Iron and Steel (Peking)*. 2006. Vol. 41. No. 8. P. 37 – 40.
- Аксенов П.Н., Трухов А.П. Прибор для испытания сырых формовочных смесей на горячую податливость // Литейное производство. 1979. № 3. С. 20 – 21.
- Щегловитов Л.А., Дивавин А.А. Установка для исследования линейной усадки и трещиностойкости литейных сталей // Литейное производство. 1980. № 2. С. 19 – 20.
- Шагалов В.Л., Попов С.И. Технологическая проба для испытания стали на трещиностойкость // Литейное производство. 1989. № 5. С. 7 – 8.
- Швецов В.И., Кулаков Б.А., Иванов М.А. Особенности производства отливок из стали. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – 240 с.
- Kuliev V.D., Cherepanov G.P. Theory of “hot” cracks // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1974. Vol. 15. No. 2. P. 229 – 234.
- Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов. – Л.: Машиностроение, 1976. – 211 с.
- Степанов Ю.А. Роль трения отливки о форму при образовании горячих трещин // Изв. вуз. Машиностроение. 1960. № 4. С. 86 – 94.
- Öchsner A., da Silva L.F.M., Altenbach H., Hojny M. Physical simulation of steel deformation in the semi-solid state // *Advanced Structured Materials*. 2016. Vol. 47. P. 85 – 119.
- Crack Dynamics in Metallic Materials. Klepaczk J. ed. – Vienna: Springer, 1990. – 497 p.
- Hills D., Kelly P., Dai D., Korsunsky A. *Solution of Crack Problems*. – Dordrecht: Springer, 1996. – 169 p.
- Константинов Л.С., Трухов А.П. Напряжения деформации трещины в отливках. – М.: Машиностроение, 1981. – 199 с.
- Choi H.J. Thermal stresses due to a uniform heat flow disturbed by a pair of offset parallel cracks in an infinite plane with orthotropy // *European Journal of Mechanics A-Solids*. 2017. Vol. 63. P. 1 – 13.
- Савинов А.С., Синицкий Е.В., Тубольцева А.С. Исследование деформационной способности песчано-глинистых смесей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. № 1(33). С. 29 – 32.
- Савинов А.С., Тубольцева А.С. Определение граничных условий при постановке задачи о силовом взаимодействии литой детали с формой // *Механика XXI века. VIII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием*. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2009. С. 57 – 60.
- Савинов А.С., Тубольцева А.С., Синицкий Е.В. Анализ силового взаимодействия литой детали с формой // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – Самара: Издательство Самарского научного центра РАН, 2011. С. 623 – 626.
- Korojy B., Nassar H., Fredriksson H. Hot crack formation during peritectic reaction in steels // *Ironmaking and Steelmaking*. 2010. Vol. 37. No. 1. P. 63 – 72.
- Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Разностные методы решения задач теплопроводности. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.
- Traidi K., Favier V., Lestriez P. etc. Thermomechanical steels behaviors at semi-solid state // *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1769. Article 030002.
- Савинов А.С., Андреев С.М., Тубольцева А.С., Синицкий Е.В. Расчет температурного поля системы отливка – песчано-глинистая форма // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 4. С. 10 – 14.
- Савинов А.С., Постникова А.С., Радомская В.В. Расчет удельной теплоемкости слоя сырой песчано-глинистой формы с различной влажностью // *Теория и технология металлургического производства*. 2017. № 3(22). С. 17 – 21.
- Тайц Н.Ю. *Технология нагрева стали*. – М.: Металлургиздат, 1962. – 568 с.
- Fuchs Hans U. *The Dynamics of Heat*. – New York: Springer-Verlag, 2010. – 734 p.
- Alabi A.G.F., Ajiboye T.K., Olusegun H.D. Measuring the stress, strain and strain-rate in heat treated medium carbon steel samples and finding the constituted material related properties // *African Journal of Mathematics and Computer Science Research*. 2010. Vol. 3. No. 3. P. 038 – 048.
- Linan A., Fedik I. *Thermal Stress Resistance of Materials*. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. – 240 p.
- Савинов А.С., Дзюба В.П., Фролушкина К.А. Моделирование напряженного состояния сырых песчано-глинистых литейных форм. – Магнитогорск, 2012. – 10 с. Деп. в ВИНТИ 11.03.2012. № 82 - В2012.
- Fredriksson H., Haddad-Sabzevar M., Hansson K., Kron J. Theory of hot crack formation // *Materials Science and Technology*. 2005. Vol. 21. No. 5. P. 521 – 530.
- Савинов А.С., Тубольцева А.С., Дзюба В.П., Фролушкина К.А. Исследование физических свойств сухих песчано-глинистых литейных форм. – Магнитогорск: МГТУ, 2012. – 41 с. Деп. в ВИНТИ 11.03.2012. № 81 - В2012.
- Кузнецов С.И. Молекулярная физика. Термодинамика: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 104 с.
- Williams T.J., Hardin R.A., Beckermann C. Thermophysical properties and performance of riser sleeves for steel castings // *Int. Journal of Metalcasting*. 2016. Vol. 10. No. 4. P. 535 – 555.
- Hojny M. Multiscale modelling of mechanical properties of steel deformed in semi-solid state - experimental background // *Key Engineering Materials*. 2014. Vol. 622 – 623. P. 643 – 650.
- Hentschke R. *Thermodynamics*. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – 279 p.

Поступила в редакцию 1 июля 2019 .

После доработки 22 августа 2020 г.

Принята к публикации 16 октября 2020 г.

CHANGE IN DUCTILITY OF A RAW SAND-CLAY MOLD UNDER INFLUENCE OF GEOMETRIC AND THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF THE CASTING

V.M. Kolokol'tsev, A.S. Savinov, N.A. Feoktistov, A.S. Postnikova

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russia

Abstract. One of the ways to increase economic efficiency of the foundry is to reduce the product cost by reducing scrap, a significant proportion of which is formed due to formation of hot and cold cracks during solidification and cooling in the casting-mold system. The formation of cracks occurs due to the force interaction of casting with mold. Currently, a number of approaches are used to determine the value of stress state in the casting material and, accordingly, to determine the value of force interaction. The paper considers the developed estimation of stress-strain state of the casting-mold system, which is determined by deformation resistance of the molding mixture. Change in deformation resistance of the molding mixture is complex due to the multi-factor nature of resulting stresses interaction with thermal and component composition of the sand-clay layer. We have studied the influence of geometric parameters and thermophysical properties of the casting on deformation resistance of the molding mixture. A mathematical model was developed that takes into account the heat transfer between casting and mold, increase in mold dry layer, and the migration of moisture in layer of the sand-clay mixture. On the basis of mathematical modeling, we have made a quantitative analysis of the influence of thermophysical properties of casting (thermal conductivity, volumetric heat capacity, heat of crystallization, geometric parameters) on ductility of raw sand-clay mold with humidity of 5 % expressed in terms of the average resistance to deformation under an obstruction element 100 mm long. It was established that increase in the above-mentioned factors, at a fixed time, increases the average value of deformation resistance. The quantitative relationship of the released heat with growth of the dry layer of the molding mixture is described. It was noted that dynamics of changes in the average temperature does not always coincide with increase in deformation resistance of the molding mixture.

Keywords: deformation resistance, geometric parameters, thermal properties, ductility, heat of crystallization, casting-mold system, thermal conductivity, sand-clay form.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-829-835

REFERENCES

1. Bochvar A.A., Rykalin N.N., Prokhorov I.I. etc. Hot crystallization cracks at casting and welding. *Liteinoe proizvodstvo*. 1960, no. 10, pp. 47. (In Russ.).
2. Madhukar Vable. *Mechanics of Materials*. 2nd ed. Michigan Technological University, 2014, 595 p.
3. Bochvar A.A., Sviderskaya Z.A. Destruction of castings under action of shrinkage stresses during crystallization depending on composition. *Izvestiya AN SSSR, OTN*. 1947, no. 3, pp. 349–354. (In Russ.).
4. Davidson C., Viano D., Lu L., St. John D. Observation of crack initiation during hot tearing. *Int. Journal of Cast Metals Research*. 2006, vol. 19, no. 1, pp. 59–65.
5. Hardin R., Choi K.K., Beckermann, C. Reliability-based casting process design optimization. *Int. Journal of Cast Metals Research*. 2015, vol. 28, no. 3, pp. 181–192.
6. Balandin G.F., Gini E.I., Matvienko Yu.P. etc. Technological sample for suppression of hot cracking in panel castings. *Izv. vuz. Mashinostroenie*. 1964, no. 1, pp. 198–203. (In Russ.).
7. Lü M., Lu B., Wang X.-X., Shan Z.-G., Zhang Q., Chen Y.-S. Research and control on web plate crack of the large type beam blank. *Iron and Steel (Peking)*. 2010, vol. 45, no. 7, pp. 99–102.
8. Liu J.-H., Bao Y.-P., Sun W., Huang S.-Q., Zhou J. Genetic analysis of surface cracks in H beam. *Iron and Steel (Peking)*. 2006, vol. 41, no. 8, pp. 37–40.
9. Aksenov P.N., Trukhov A.P. Unit for testing raw molding mixtures for hot ductility. *Liteinoe proizvodstvo*. 1979, no. 3, pp. 20–21. (In Russ.).
10. Shcheglovitov L.A., Divavin A.A. Unit for testing linear shrinkage and crack resistance of foundry steels. *Liteinoe proizvodstvo*. 1980, no. 2, pp. 19–20. (In Russ.).
11. Shagalov V.L., Popov S.I. Technological sample for testing steel for crack resistance. *Liteinoe proizvodstvo*. 1989, no. 5, pp. 7–8. (In Russ.).
12. Shvetsov V.I., Kulakov B.A., Ivanov M.A. *Osobennosti proizvodstva otlivok iz stali: monografiya* [Production Features of Steel Castings: Monograph]. Chelyabinsk: YuUrGU, 2014, 240 p. (In Russ.).
13. Kuliev V.D., Cherepanov G.P. Theory of “hot” cracks. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1974, vol. 15, no. 2, pp. 229–234.
14. Gulyaev B.B. *Teoriya liteinykh protsessov* [Theory of Foundry Processes]. Leningrad: Mashinostroenie, 1976, 211 p. (In Russ.).
15. Stepanov Yu.A. The role of casting friction on mold in hot cracks formation. *Izv. vuz. Mashinostroenie*. 1960, no. 4, pp. 86–94. (In Russ.).
16. Öchsner A., da Silva L.F.M., Altenbach H., Hojny M. Physical simulation of steel deformation in the semi-solid state. *Advanced Structured Materials*. 2016, vol. 47, pp. 85–119.
17. *Crack Dynamics in Metallic Materials*. Klepaczko J. ed. Vienna: Springer, 1990, 497 p.
18. Hills D., Kelly P., Dai D., Korsunsky A. *Solution of Crack Problems*. Dordrecht: Springer, 1996, 169 p.
19. Konstantinov L.S., Trukhov A.P. *Napryazheniya deformatsii i treschiny v otlivkakh* [Deformation Stresses and Cracks in Castings]. Moscow: Mashinostroenie, 1981, 199 p. (In Russ.).
20. Choi H.J. Thermal stresses due to a uniform heat flow disturbed by a pair of offset parallel cracks in an infinite plane with orthotropy. *European Journal of Mechanics A – Solids*. 2017, vol. 63, pp. 1–13.
21. Savinov A.S., Sinitskii E.V., Tubol'tseva A.S. Investigation of deformation capacity of sand-clay mixtures. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2011, no. 1(33), pp. 29–32. (In Russ.).
22. Savinov A.S., Tubol'tseva A.S. Determination of boundary conditions when setting the problem of force interaction of cast part with mold. In: *Mekhanika XXI veka. VIII Vserossiiskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem* [Mechanics of the XXI Century. VIII All-Russian Sci. and Tech. Conference with Int. Participation]. Bratsk: BrGU, 2009, pp. 57–60. (In Russ.).
23. Savinov A.S., Tubol'tseva A.S., Sinitskii E.V. Analysis of force interaction of cast part with mold. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. Samara: Izdatel'stvo Samarskogo nauchnogo tsentra RAN, 2011, pp. 623–626. (In Russ.).
24. Koroy B., Nassar H., Fredriksson H. Hot crack formation during peritectic reaction in steels. *Ironmaking and Steelmaking*. 2010, vol. 37, no. 1, pp. 63–72.
25. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. *Raznostnye metody resheniya zadach teploprovodnosti* [Difference Methods for Solving Heat Transfer Problems]. Tomsk: TPU, 2007, 172 p. (In Russ.).
26. Traidi K., Favier V., Lestriez P., Saby M., Mangin P. Thermomechanical steels behaviors at semi-solid state. *AIP Conference Proceedings*. 2016, vol. 1769, article 030002.

27. Savinov A.S., Andreev S.M., Tubol'tseva A.S., Sinitskii E.V. Calculation of temperature field of sand-clay mold – casting system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 4, pp. 10–14. (In Russ.).
28. Savinov A.S., Postnikova A.S., Radomskaya V.V. Calculation of the specific heat capacity of a layer of raw sand-clay mold with different humidity. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2017, no. 3(22), pp. 17–21. (In Russ.).
29. Taitis N.Yu. *Tekhnologiya nagreva stali* [Technology of Steel Heating]. Moscow: Metallurgizdat, 1962, 568 p. (In Russ.).
30. Fuchs Hans U. *The Dynamics of Heat*. New York: Springer-Verlag, 2010, 734 p.
31. Alabi A.G.F., Ajiboye T.K., Olusegun H.D. Measuring the stress, strain and strain-rate in heat treated medium carbon steel samples and finding the constituted material related properties. *African Journal of Mathematics and Computer Science Research*. 2010, vol. 3, no. 3, pp. 038–048.
32. Lanin A., Fedik I. *Thermal Stress Resistance of Materials*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, 240 p.
33. Savinov A.S., Dzyuba V.P., Frolushkina K.A. *Modelirovanie napryazhennogo sostoyaniya syrykh peschano-glinistyykh liteinykh form* [Modeling of Stress State of Raw Sand-Clay Molds]. Magnitogorsk: MGTU, 2012, 10 p. (In Russ.).
34. Fredriksson H., Haddad-Sabzevar M., Hansson K., Kron J. Theory of hot crack formation. *Materials Science and Technology*. 2005, vol. 21, no. 5, pp. 521–530.
35. Savinov A.S., Tubol'tseva A.S., Dzyuba V.P., Frolushkina K.A. *Issledovanie fizicheskikh svoystv sukhikh peschano-glinistyykh liteinykh form* [Investigation of Physical Properties of Dry Sand-Clay Molds]. Magnitogorsk: MGTU, 2012, 41 p. (In Russ.).
36. Kuznetsov S.I. *Molekulyarnaya fizika. Termodinamika* [Molecular Physics. Thermodynamics]. Tomsk: TPU, 2006, 104 p. (In Russ.).
37. Williams T.J., Hardin R.A., Beckermann C. Thermophysical properties and performance of riser sleeves for steel castings. *Int. Journal of Metalcasting*. 2016, vol. 10, no. 4, pp. 535–555.
38. Hojny M. Multiscale modelling of mechanical properties of steel deformed in semi-solid state - experimental background. *Key Engineering Materials*. 2014, vol. 622–623, pp. 643–650.
39. Hentschke R. *Thermodynamics*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2014, 279 p.

Information about the authors:

V.M. Kolokol'tsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, President
(kwm@magtu.ru)

A.S. Savinov, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Director of the Institute of Mechanical Engineering and Materials Processing
(savinov_nis@mail.ru)

N.A. Feoktistov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair "Foundry Processes and Materials Science" (fna87@mail.ru)

A.S. Postnikova, Senior Lecturer of the Chair of Mechanics
(a-tus@mail.ru)

Received July 1, 2019

Revised September 22, 2020

Accepted October 16, 2020

THE USE OF CARBON-CONTAINING WASTES OF ALUMINUM PRODUCTION IN FERROUS METALLURGY*

M.P. Kuz'min¹, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Non-Ferrous Metallurgy",
Deputy Head of the Chair "Metallurgy of Light Metals", Research Associate of Innovation and Technology Center*

M.Yu. Kuz'mina¹, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Non-Ferrous
Metallurgy" (kuzmina.my@yandex.ru)*

Jia Q. Ran², *PhD, Assist. Professor of College of Mechatronics and Control Engineering*

A.S. Kuz'mina¹, *Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of the Laboratory "Physical Properties
of Micro- and Nanostructures"*

A.E. Burdonov¹, *Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory "Mineral Processing
and Environmental Protection"*

¹ **Irkutsk National Research Technical University**

(83 Lermontov str., Irkutsk, 664074, Russia)

² **Shenzhen University**

(3688, Nanhai Ave., Shenzhen, Guang Dong Province, 518060, China)

Abstract. The article discusses the prospects of recycling the most massive wastes of aluminum production (namely, used cathode blocks of electrolyzers, gas treatment dust, gas treatment residue, and flotation tailing). It has been indicated the volumes of waste accumulation and a special attention has been focused on the need of their disposal with a view to improve the environmental conditions of the territories adjacent to the industrial zones. Specific characteristics of the generated waste have been determined, which indicate the possibility of their secondary use and transfer from waste to by-products. Existing technical solutions relevant to the issue have been reviewed, and the reasons preventing their implementation have been explained. The most promising methods of waste processing to be carried out successfully in the current economic conditions have been identified. Spent cathode blocks can be used at ferrous metallurgy enterprises (in blast furnaces and converters) as a substitute for expensive coke and fluorspar, and finely dispersed waste can be used at cement enterprises. The areas have been determined that in the future will significantly increase the volume of processing and the demand for these wastes of the aluminum industry in technological processes of ferrous metallurgy. The possibilities for cooperation between aluminum refineries and ferrous metallurgy enterprises, as well as other related industries, were emphasized in detail.

Key words: aluminum production, waste, electrofilter dust, gas treatment residue, flotation tailings, cathode lining, cement production.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-836-841

At present, the prospects of aluminum industry are closely connected to development of resource conservation and environmental technologies aimed at efficient processing of secondary materials and industrial waste utilization. Industrial waste of the aluminum industry constitutes about 20 % of all the refuse generated in the production of non-ferrous metals in Russia [1].

Currently, most of the aluminum is produced by electrolysis of cryolite-alumina melts in electrolyzers with self-baking Soderberg anodes. Waste materials typical for such a technology include electrofilter dust, gas treatment residue, flotation tailings as well as used cathode lining of electrolyzers. The issues pertaining to effective utilization of that waste have been repeatedly addressed in the scientific and technical literature [2 – 5].

For example, the work [3] discusses a technology that allows utilization of cathode lining of electrolyzers by sin-

tering the lining during the process of alumina production. The authors present a combination method of utilizing the lining where the pyrometallurgical process is followed by the leaching of the sintered products.

The mechanical method of utilizing the carbon part of the lining consists of subjecting the part to flotation with a view to obtain a fluorine concentrate which then is used in the electrolysis production of aluminum [4]. Likewise, for electrolyzers with Soderberg anodes, there exist techniques for introducing the carbon part of the lining into the anode mass [5]. However, the material costs associated with the preparation of the coal lining as well as its negative impact on the anode technology exceed the economic effect related to utilization of this type of waste.

Physical and chemical foundations of the carbonation method of regenerating fluorine from the used lining as well as the methods of intensification of the process are presented in [1]. The specialists of "SibVAMI", JSC, Irkutsk, made a great contribution to the development and implementation of this technology at Achinsk Alumina Refinery (ALR) [1, 2, 5].

* The research was financially supported by the grant for scientific and pedagogical collectives of Irkutsk National Research Technical University (project number 02-fpk-19).

The possibility of using fine materials of the slurry fields in production of cement is considered as the most promising and economically feasible option [5]. Based on the studies conducted at Angarsk Cement Plant (“Angarsk cement”, JSC), an optimal amount of the fine materials additive introduced into the raw slurry was determined, and the economic effect of reducing the volume of conventional fuel used in the process was demonstrated.

The use of fluorocarbon-containing materials as a replacement for traditionally used fluorspar-based mineralizers in the process of obtaining Portland cement clinker is described in [6–10]. The authors examined the influence that such types of waste have on the burning process of cement clinker and the quality of the final product. Comparative analysis of the microstructure of Portland cement clinker was also conducted, and the properties of the obtained cement (in accordance with GOST 310.4–81) were explored.

Among a wide variety of methods for processing and disposal of cathode blocks and fluorocarbon-containing arrays of the slurry fields, it is deemed essential to consider the techniques most suitable for large-scale implementation.

Used cathode hearth blocks are a lumpy dark gray mass with small pores (up to 0.2 mm) which are quite uniformly filled with fluoride salts. The density of cathode blocks reaches 2.5 g/cm³. Used cathode blocks are the main component of the waste generated by the aluminum industry as 10–12 kg of the refuse is produced per 1 ton of commercial aluminum [1]. Used cathode blocks can be partially utilized, and the valuable components may be returned to the process of aluminum production [11]. However, as a result of the change in the technology of electrolytic production of aluminum, most of the developments related to the return of valuable components (Na, Al, F) in the electrolysis process has lost relevance. For instance, acidification of electrolytes in the aluminum electrolyzers led to a change in the balance of the consumption structure of fluorine and sodium compounds. There is a disproportion between the increased release of alkaline regenerative cryolite (because of the increased concentration of HF in the electrolysis gases due to the use of acid electrolytes) and its limited application in aluminum electrolysis. Therefore, the use of such waste materials in related industries is deemed rational.

Average chemical composition of the samples of used cathode lining is presented in Table 1.

As seen, the fluorine content in the carbon blocks equals around 15 %, which is enough to ensure their successful application in ferrous metallurgy where various techniques are used to accelerate slag formation during steel smelting. It can also be achieved by introducing the materials reducing the slag melting point into the charge. Fluorspar CaF₂ is commonly used for that purpose, as its inclusion reduces the viscosity of the slag and ensures high process efficiency. However, as its natural reserves are limited, fluorspar is quite an expensive and scarce raw material. Hence, a wide range of natural and artificial materials containing fluorides of alkaline and alkaline earth metals, such as NaF, KF, MgF₂, has been tested in ferrous metallurgy.

Coal blocks of used electrolyzers appear to be the most valid replacement of fluorspar. Due to its bulk composition and sufficient mechanical strength, the blocks can be used in converter without significant preparation [12, 13]. When the fragments of the used blocks are heated, fluorine from cryolite and chiolite passes into thermally stable compounds CaF₂, CaO·11Al₂O₃·7CaF₂, which perform the function of a fusible low-viscosity flux, and the burning carbon provides additional energy to the process.

Industrial tests of the coal blocks in converter were carried out at the West Siberian Metallurgical Plant (“ZSMK”, JSC). A total of 45 pilot heats were conducted, which allowed to determine the methodology and to prove the feasibility of replacing fluorspar with the coal blocks [1]. The first pilot heat confirmed the need for thorough preparation of the used blocks with regard to their fractional composition, as large pieces create difficulties during transportation along the existing supply routes of the charge materials. Besides, the ingress of large pieces of the blocks in converter in the last third of the blow process causes its intense combustion in slag even after the blow. That, in turn, leads to intense gas emission and incomplete assimilation of the carbon blocks by metallic and slag melts. The optimal fractional composition of the blocks – 20 mm to 80–100 mm – was determined empirically.

During the tests, it was discovered that to improve slag formation, it is advisable to ore down the most of the coal blocks at beginning of the blowing process. In that case, fluxing effect is slightly delayed in comparison with the use

Table 1

Chemical composition of the samples of used cathode lining

Таблица 1. Химический состав образцов отработанной катодной футеровки

Components of the lining	Elements and compounds, %, mass.									
	F	Al	Na	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₄	Ca	Mg	Tar	LOI (loss-on-ignition)
Coal hearth blocks	13.8	10.2	10.0	1.66	3.34	0.52	0.94	0.81	0.15	49.61
Coal side blocks	14.8	8.2	12.0	1.40	1.33	1.00	2.07	1.25	0.15	38.80

of fluorspar. Yet, the effect of oxides and fluorides of alkaline and alkaline-earth metals contained in the coal blocks is longer and more uniform, in contrast to the short-term effect of fluorspar.

Aluminum industry generates large volumes of fine fluorocarbon-containing waste. It includes gas treatment dust, gas treatment residue, and coal foam flotation tailings, which are formed in approximately equal volume of 10 – 12 kg per ton of commercial aluminum [1]. Average chemical composition of contents of the slurry field is presented in Table 2.

Generation and accumulation of this type of waste creates a serious problem for aluminum plants. For instance, the annual volume of waste stored in the slurry fields of four refineries located in Siberian Federal district (Irkutsk, Bratsk, Krasnoyarsk and Novokuznetsk aluminum plants) exceeds 70 thousand tons. The slurry fields at the refineries are close to being filled completely [7]. The formation of new slurry fields is problematic due to the complexity of land acquisition (namely, lack of available space in the immediate vicinity of refineries) and significant financial costs.

Fine fluorocarbon-containing dust is partially used in the process of burning cement clinker in the cement industry [5, 7, 14]. A number of cement factories are forced to work with so-called high-sintering/hard-to-produce raw materials. At these plants, fluorspar is commonly used to intensify the process of reactions in solid phases. A dust-like fraction from the slurry fields of aluminum refineries can serve as an adequate replacement for that material. At a given concentration, the dust mixture is easily mixed in the raw slurry preparation tanks for feeding to the kiln.

Besides, this additive produces a double effect – fluorine ions lower the melting point, and carbon, while burning, saves fuel, which significantly reduces the cost of the final product.

The impact fluorocarbon-containing additives have on the degree of decarbonization is displayed in Fig. 1.

Fig. 1 demonstrates the temperature dependence of the degree of calcium carbonate decomposition during burning of the raw slurry (1) and the slurry with an additive (2) (0.1 % equivalent to fluorine). The dependence is obtained by graphical and mathematical processing of the corresponding derivatograms. Fig. 1 shows that at the same temperatures the degree of CaCO_3 decarbonization in the sample with an additive is 20 – 60 % higher than in the sample consisting of the raw slurry, which automatically reduces the specific fuel consumption.

However, fine fluorocarbon-containing wastes of aluminum production have not been implemented into the cement industry on the large scale as such wastes contain sodium, and content of sodium in the final product is strictly regulated.

Since 2009, only Angarsk Cement Plant has been fully using fine fluorocarbon-containing materials. It was preceded by a long-term collaboration between cement technologists and metallurgists with a view to prepare all components of the raw slurry and determine the exact dosages of fluorocarbon-containing additives.

Numerous experiments conducted at Angarsk Cement Plant have determined that addition of fluorocarbon-containing dust in the amount of 0.15 % (equivalent to fluorine) to the composition of the raw slurry increases sodium content in the outgoing clinker by 0.05 – 0.06 % which is

Table 2

Chemical composition of the contents of slurry field

Таблица 2. Химический состав содержимого шламового поля

Chemical composition, % (wt.)		Molecular composition, % (wt.)		
Element	Element content (average)	Compound	Formula	Compound content (average)
F	19.5	Cryolite	Na_3AlF_6	11.05
Al	11.6	Chiolite	$\text{Na}_5\text{Al}_3\text{F}_{14}$	21.81
Na	10.3	Aluminum oxide	Al_2O_3	12.00
Ca	0.85	Calcium fluoride	CaF_2	1.66
Mg	0.2	Magnesium fluoride	MgF_2	0.33
C	45.0	Carbon	C	45.0
Fe	1.4	Iron oxide	Fe_2O_3	2.00
Si	0.25	Silicon oxide	SiO_2	0.54
S	0.9	Sodium sulphate	Na_2SO_4	4.00
Other	10.0	Other	–	1.61

Note: 1) particle size distribution: 85 % (wt.) is a fraction of 0.2 – 0 mm, class 0.2 – 1.0 mm – not more than 15 % (wt.); 2) Moisture not more than 20 % (wt.).

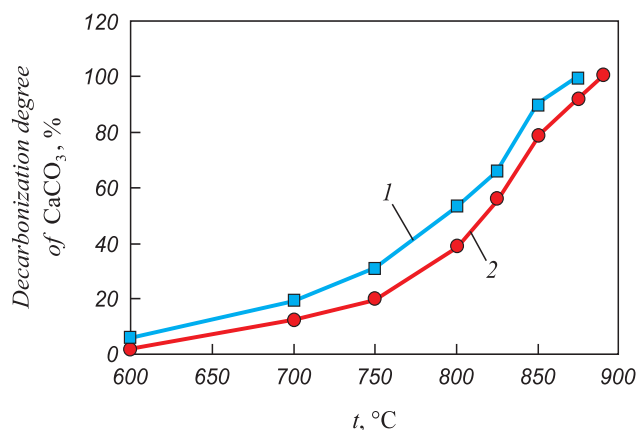


Fig. 1 Temperature dependence of the degree of CaCO_3 decarbonization during the burning process:
1 – raw slurry; 2 – raw slurry + additive 0.10 % (wt.) equivalent to fluorine

Рис. 1 Температурная зависимость степени декарбонизации CaCO_3 при обжиге:

1 – индивидуальный сырьевой шлам;

2 – сырьевой шлам + добавка 0,10 % (по массе) в пересчете на фтор

not considered critical. At the same time, rheological properties of the raw slurry have been improving, and the specific consumption of the conventional fuel has been reduced by 6 kg/t (3 %). Besides, all the quality indicators of the obtained clinker are preserved. The experience of Angarsk Cement Plant can serve as an example for other cement factories that use fluorine-containing mineralizers.

Transformation of the dust fraction into durable briquettes, convenient for loading and transportation, could open the possibility for the large-scale use of the contents of the slurry fields in related industries (Fig. 2).

This material could be utilized in ferrous metallurgy both in converter processing (according to the scheme presented above) and in blast furnaces as a partial replacement of coke. It would also make possible to produce briquettes that could perform several functions simultaneously. For example, upon the addition of lime to the pulverized mixture, the resulting briquette could also serve as a desulfurizer. However, serious requirements are imposed on such briquettes in terms of their mechanical strength and moisture resistance.

Namely, the resulting briquettes should be able to:

- withstand three times the load when loaded with a mechanical shovel into cars; smalls formation not to exceed 9 %;
- absorb moisture not exceeding 8 % when in the open; and
- the binders should not affect the functional properties of the additive.

The process of obtaining briquettes of a given quality constitutes separate work that has not been conducted until the present moment [1, 9, 15 – 25]. This work may be particularly important for enterprises engaged in the production of electrode, cathode and carbon graphite products,



Fig. 2. Briquettes made of the pulverized waste

Рис. 2. Брикеты из пылевидных отходов

which also accumulate a significant amount of high calorie fine coal dust.

Conclusions. The use of cathode blocks in the field of ferrous metallurgy was established to be the most rational way of their utilization. The benefits for aluminum refineries are primarily associated with minimizing the cost of cathode blocks utilization; the advantages for ferrous metallurgy enterprises deal with the possibility of replacing expensive substances such as coke and fluorspar with cheap processed carbon-containing raw materials.

The use of fine waste of aluminum industry in the cement production was determined to be the most efficient way of handling such refuse. As the issue has been examined sufficiently, and the technology has been practically tested, successful disposal of fine waste of the aluminum production requires close cooperation between aluminum and cement plants in order to determine the needs and capabilities of the interested parties.

REFERENCES

1. Kulikov B.P. Istomin S.P. *Pererabotka otkhodov alyuminievogo proizvodstva* [Aluminum Waste Recycling]. SPb.: Izd-vo MANEB, 2004, 477 p. (In Russ.).
2. Kondrat'ev V.V., Rzhchitskii E.P., Shakhrai S.G., Karlina A.I., Sysoev I.A. Recycling of electrolyzer spent carbon-graphite lining with aluminum fluoride regeneration. *Metallurgist*. 2016, no. 5–6, pp. 571–575.
3. Gu Yanxin etc. Recycling and re-use of a spent cell base: Practice of usage in China. *Light Metals*. 1994, no. 5, pp. 269–273.
4. Borisoglebskii Yu.V., Bezrukov V.A., Vetyukov M.M. Effect of additives of aluminum electrolyzers spent lining to anode mass on anode consumption. *Tsvetnye metally*. 1996, no. 8, pp. 37–39. (In Russ.).
5. Kulikov B.P., Barinov V.V., Nikolaev M.D., Pyrkova I.V., Shuvalova S.A. Disposal of fluorine-containing waste from aluminum production in cement industry. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2010, no. 5, pp. 4–6. (In Russ.).
6. Kondrat'ev V.V., Nemchinova N.V., Ivanov N.A., Ershov V.A., Sysoev I.A. New production solutions for processing silicon and aluminum production waste. *Metallurgist*. 2013, no. 5–6, pp. 455–459.
7. Kulikov B.P., Nikolaev M.D., Kuznetsov A.A., Barinov V.V., Pyrkova I.V. Obtaining clinker using a fluorine-based waste mineralizer. *Tsement i ego primenenie*. 2010, no. 2, pp. 102–105. (In Russ.).

8. Kuz'min M.P., Larionov L.M., Kondratiev V.V., Kuz'mina M.Yu., Grigoriev V.G., Kuz'mina A.S. Use of the burnt rock of coal deposits slag heaps in the concrete products manufacturing. *Construction and Building Materials*. 2018, vol. 179, pp. 117–124.
9. Nath S.K., Sanjay Kumar. Evaluation of the suitability of ground granulated silico-manganese slag in Portland slag cement. *Construction and Building Materials*. 2016, vol. 125, pp. 127–134.
10. Davoud Tavakoli, Amir Tarighat. Molecular dynamics study on the mechanical properties of Portland cement clinker phases. *Computational Materials Science*. 2016, vol. 119, pp. 65–73.
11. Brough D., Jouhara H. The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery. *Int. Journal of Thermofluids*. 2020, vol. 1–2, article 100007.
12. Nazyuta L.Yu., Starovoi A.G. Analysis of the raw material base of metallurgical production. *Metallurgiya i koksokhimiya*. 1979, no. 63, pp. 19–22. (In Russ.).
13. Demidov K.N. Preliminary heating of scrap in converter with cobbled carbon-containing fuel. *Stal'*. 1987, no. 5, pp. 27–30. (In Russ.).
14. Agrawal A., Sahu K.K., Pandey B.D. Solid waste management in non-ferrous industries in India. *Resources, Conservation and Recycling*. 2004, vol. 42, no. 2, pp. 99–120.
15. Kuz'mina M.Yu., Kuz'min P.B. On the production of ingots of primary silumin modified by strontium. *Liteinoe proizvodstvo*. 2014, no. 8, pp. 2–5. (In Russ.).
16. Anfilogova L.A., Belousova O.V., Kuz'mina M.Yu., Bogidaev S.A. Effective technologies in processing of rare earth raw materials. *Tsvetnaya metallurgiya*, 2005, no 2, pp. 17–21. (In Russ.).
17. Fedorov S.N., Kurtenkov R.V., Vasiliev V.V. Stabilization TiO₂ anatase by F-ion doping for solar panel producing. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1124, no. 4, article 041026.
18. Kondratiev V.V., Rzhchitskiy E.P., Bogdanov Y.V., Sysoev I.A., Karlina A.I. Technology of the thermal extraction of fluorosols from spent refractory lining. *Int. Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 23. pp. 13812–13819.
19. Gorlanov E.S., Bazhin V.Yu., Fedorov S.N. Carbide formation at a carbon-graphite lining cathode surface wettable with aluminum. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2016, vol. 57, no. 3, pp. 292–296.
20. Florentino-Madiedo L., Díaz-Faes E., Barriocanal C. Reactivity of biomass containing briquettes for metallurgical coke production. *Fuel Processing Technology*. 2019, vol. 193, pp. 212–220.
21. Zenkov E.V., Tsvik L.B. The formation of differently directed test forces and experimental evaluation of material strength under biaxial stretching. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2018, no. 1–2, pp. 71–76.
22. Jagmeet Singh, Singh S.P. Geopolymerization of solid waste of non-ferrous metallurgy – A review. *Journal of Environmental Management*. 2019, vol. 251, article 109571.
23. Zenkov E.V. Update of the equations of the limit state of the structural material with the realization of their deformation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017, vol. 944, article UNSP012128.
24. Zenkov E.V., Tsvik L.B. Increasing the reliability the combined criteria of the static strength of a material of complexly loaded deformable structures. *Materials Physics and Mechanics*. 2018, vol. 40, no. 1, pp. 124–132.
25. Diez M.A., Alvarez R., Cimadevilla J.L.G. Briquetting of carbon-containing wastes from steelmaking for metallurgical coke production. *Fuel*. 2013, vol. 114, pp. 216–223.

Received January 23, 2020

Revised May 20, 2020

Accepted October 16, 2020

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ. 2020. Том 63. № 10. С. 836–841.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА АЛЮМИНИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Кузьмин М.П.¹, Кузьмина М.Ю.¹, Джиа Ку. Ран², Кузьмина А.С.¹, Бурдонов А.Е.¹

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 83)

²Шэньчжэньский университет (518060, Китай, провинция Гуан Донг, Шэньжень, пр. Наньхай, 3688)

Аннотация. Представлены наиболее масштабные виды отходов алюминиевого производства (отработанные катодные блоки электролизеров, пыль газоочистки, шламы газоочистки, хвосты флотации угольной пены). Обозначены объемы их накопления и акцентировано внимание на необходимости их утилизации для улучшения экологической обстановки прилегающих к предприятиям территорий. Определены специфические характеристики образовавшихся отходов, указывающие на возможность их вторичного использования и перевода из разряда отходов в побочные продукты. Рассмотрены возможности переработки, проведен обзор существующих по данному направлению технических решений, а также объяснены причины, препятствующие их реализации. Определены наиболее перспективные способы переработки отходов, реализацию которых можно произвести в существующих экономических условиях. Отработанные катодные блоки могут быть использованы на предприятиях черной металлургии (в доменных печах и конвертерах) в качестве замены дорогостоящего кокса и плавикового шпата, а мелкодисперсные отходы – на предприятиях цементной промышленности. Обозначены направления, которые в будущем позволят существенно увеличить объемы пе-

реработки, повысить востребованность указанных отходов алюминиевой промышленности в технологических пределах черной металлургии. Несмотря на то, что особое внимание уделено перспективам сотрудничества алюминиевых заводов с предприятиями черной металлургии, показаны примеры уже внедренных решений по совершенствованию сырьевой базы в других смежных отраслях промышленности.

Ключевые слова: алюминиевое производство, отходы, пыль электролизеров, шламы газоочистки, хвосты флотации, катодная футеровка, производство цемента.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-836-841

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куликов Б.П., Истомин С.П. Переработка отходов алюминиевого производства – СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2004. – 477 с.
2. Кондратьев В.В., Ржечицкий Э.П., Шахрай С.Г. и др. Переработка отработанной углеграфитовой футеровки электролизеров с регенерацией фтористого алюминия // *Металлург*. 2016. № 6. С. 28 – 31.
3. Gu Yanxin etc. Recycling and re-use of a spent cell base: Practice of usage in China // *Light Metals*. 1994. No. 5. P. 269 – 273.
4. Борисоглебский Ю.В., Безруков В.А., Ветюков М.М. Влияние добавок отработанной футеровки алюминиевых электролизеров в анодную массу на расход анода // *Цветные металлы*. 1996. № 8. С. 37 – 39.
5. Куликов Б.П., Баринов В.В., Николаев М.Д. и др. Утилизация фторсодержащих отходов алюминиевого производства в це-

- ментной промышленности // Экология и промышленность России. 2010. № 5. С. 4 – 6.
6. Кондратьев В.В., Немчинова Н.В., Иванов Н.А. и др. Новые технологические решения по переработке отходов кремниевых и алюминиевых производств // *Металлург*. 2013. № 5. С. 92 – 95.
 7. Куликов Б.П., Николаев М.Д., Кузнецов А.А. и др. Получение клинкера с использованием минерализатора на основе фторсодержащих отходов // *Цемент и его применение*. 2010. № 2. С. 102 – 105.
 8. Kuz'min M.P., Larionov L.M., Kondratiev V.V. etc. Use of the burnt rock of coal deposits slag heaps in the concrete products manufacturing // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 179. P. 117 – 124.
 9. Nath S.K., Sanjay Kumar. Evaluation of the suitability of ground granulated silico-manganese slag in Portland slag cement // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 125. P. 127 – 134.
 10. Davoud Tavakoli, Amir Tarighat. Molecular dynamics study on the mechanical properties of Portland cement clinker phases // *Computational Materials Science*. 2016. Vol. 119. P. 65 – 73.
 11. Brough D., Jouhara H. The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery // *Int. Journal of Thermofluids*. 2020. Vol. 1 – 2. Article 100007.
 12. Назюта Л.Ю., Старовойт А.Г. Анализ сырьевой базы металлургического производства // *Металлургия и коксохимия*. 1979. Вып. 63. С. 19 – 22.
 13. Демидов К.Н. Предварительный нагрев лома в конвертере кусковым углеродсодержащим топливом // *Сталь*. 1987. № 5. С. 27 – 30.
 14. Agrawal A., Sahu K.K., Pandey B.D. Solid waste management in non-ferrous industries in India // *Resources, Conservation and Recycling*. 2004. Vol. 42. No. 2. P. 99 – 120.
 15. Кузьмина М.Ю., Кузьмин П.Б. О производстве чушек первичных силуминов, модифицированных стронцием // *Литейное производство*. 2014. № 8. С. 2 – 5.
 16. Анфилогова Л.А., Белоусова О.В., Кузьмина М.Ю., Богидарев С.А. Эффективные технологии при переработке редкоземельного сырья и материалов // *Изв. вуз. Цветная металлургия*. 2005. № 2. С. 17 – 21.
 17. Fedorov S.N., Kurtenkov R.V., Vasiliev V.V. Stabilization TiO_2 anatase by F-ion doping for solar panel producing // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1124. No. 4. Article 041026.
 18. Kondratiev V.V., Rzhchitskiy E.P., Bogdanov Y.V. etc. Technology of the thermal extraction of fluorosols from spent refractory lining // *Int. Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 12. No. 23. P. 13812 – 13819.
 19. Gorlanov E.S., Bazhin V.Yu., Fedorov S.N. Carbide formation at a carbon-graphite lining cathode surface wettable with aluminum // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2016. Vol. 57. No. 3. P. 292 – 296.
 20. Florentino-Madiedo L., Díaz-Faes E., Barriocanal C. Reactivity of biomass containing briquettes for metallurgical coke production // *Fuel Processing Technology*. 2019. Vol. 193. P. 212 – 220.
 21. Zenkov E.V., Tsvik L.B. The formation of differently directed test forces and experimental evaluation of material strength under biaxial stretching // *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2018. No. 1–2. P. 71 – 76.
 22. Jagmeet Singh, Singh S.P. Geopolymerization of solid waste of non-ferrous metallurgy – A review // *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 251. Article 109571.
 23. Zenkov E.V. Update of the equations of the limit state of the structural material with the realization of their deformation // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. Vol. 944. Article UNSP012128.
 24. Zenkov E.V., Tsvik L.B. Increasing the reliability the combined criteria of the static strength of a material of complexly loaded deformable structures // *Materials Physics and Mechanics*. 2018. Vol. 40. No. 1. P. 124 – 132.
 25. Diez M.A., Alvarez R., Cimadevilla J.L.G. Briquetting of carbon-containing wastes from steelmaking for metallurgical coke production // *Fuel*. 2013. Vol. 114. P. 216 – 223.
- Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта по финансовой поддержке научно-педагогических коллективов ИРНИТУ (проект № 02-ФПК-19).
- Информация об авторах:**
- Кузьмин М.П.**, к.т.н., доцент кафедры «Металлургия цветных металлов», зам. заведующего кафедрой «Металлургия легких металлов», научный сотрудник инновационно-технологического центра
- Кузьмина М.Ю.**, к.т.н., доцент кафедры «Металлургия цветных металлов» (kuzmina.my@yandex.ru)
- Джиса Ку. Ран, PhD**, доцент колледжа мехатроники и управления
- Кузьмина А.С.**, к.ф.-м.н., научный руководитель лаборатории физических свойств микро- и наноструктур
- Бурдонов А.Е.**, к.т.н., научный руководитель лаборатории обогащения полезных ископаемых и охраны окружающей среды
- Поступила в редакцию 23 января 2020 г.
После доработки 20 мая 2020 г.
Принята к публикации 16 октября 2020 г.

ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ЖЕЛЕЗА ИЗ ОКСИДОВ

Бердников В.И.¹, к.т.н., доцент, старший научный сотрудник (berdnikov-chel@mail.ru)
Гудим Ю.А.², д.т.н., профессор

¹ООО Промышленная компания «Технология металлов»
(454018, Россия, Челябинск, ул. Косарева 63, офис 486)

²Южно-Уральский государственный университет
(454080, Россия, Челябинск, пр. Ленина, 76)

Аннотация. Химический процесс, сопровождающийся восстановлением железа из гематита, моделировался посредством компьютерного программного комплекса Терра (продукт МГТУ им. Н.Э. Баумана). В роли восстановителей принимали углерод, водород и метан. Варьируя расход восстановителей и температуру процесса, определяли равновесные концентрации компонентов системы. Изменение этих концентраций на границах отдельных температурных областей расценивалось как результат прохождения в них соответствующих химических реакций. В то же время было отмечено, что реакции невариантного типа начинаются и заканчиваются при одних и тех же фиксированных температурах. Расчеты показали, что преобразование $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ во всех случаях было термодинамически возможно при температурах, превышающих 65 °С. Следовательно, при рабочих температурах печи оно будет реализовано без осложнений. Вторая стадия восстановления также проходила по единой схеме $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}$, минуя участие в ней оксида FeO. Температура начала восстановления железа компонентами C, H₂ и CH₄ составила соответственно 680, 350 и 520 °С. При этом имело место только прямое восстановление железа указанными компонентами. Попытка зафиксировать факт косвенного восстановления, используя в качестве восстановителя оксид углерода, оказалась безуспешной даже при его большом расходе. Оксид углерода разлагался при низких температурах по реакции Белла-Будуара. Поэтому железо восстанавливалось посредством «сажистого» углерода, т. е. также прямым методом. В завершающей стадии углеродотермического процесса в зависимости от состава системы может произойти образование карбида железа при 720 °С с возможным последующим преобразованием его обратно в железо, а также вторичное окисление железа с образованием вюстита. Активное участие в этих реакциях принимает диоксид углерода. На основании результатов расчетов химических процессов при высоких температурах была дана численная оценка восстановительной (или окислительной) эффективности всех элементов и компонентов системы Fe–O–C–H. Это позволило с высокой степенью достоверности прогнозировать фазовый состав продуктов реакций при максимальной температуре процесса (1500 °С).

Ключевые слова: химическая реакция, восстановление железа, гематит, магнетит, оксид углерода, диоксид углерода, фазовая диаграмма, доменная печь.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-842-847

Химические реакции, возникающие при восстановлении железа из железорудного сырья, изучались ранее в основном при исследовании процесса доменной плавки чугуна [1 – 5]. Полученная информация использовалась также при анализе многих аналогичных внедоменных процессов [6, 7] и связанных с ними технологий (металлизация окатышей [8], отжиг порошков железа [9] и др.). Основные выводы, полученные при этом, заключались в следующем:

- восстановление железа осуществляется последовательно по схеме акад. А.А. Байкова: $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$, однако при пониженных температурах допускалась схема $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}$ [1, 2];

- имеет место как прямое углеродотермическое восстановление железа по реакции $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$, так и не прямое (косвенное) по реакции $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$.

Проверка этих положений в данной работе выполнялась путем компьютерного моделирования с использованием метода, условно именуемого «многокомпонентным термодинамическим анализом» (МТА). В отличие

от традиционного термодинамического анализа, здесь в число основных параметров процесса включались не только температура T и давление газа P , но и суммы атомных масс N_j по каждому j -му химическому элементу системы. Такой подход позволял привлекать к анализу большое, в принципе неограниченное число химических соединений, но получать при этом всегда однозначные решения [10]. Достоверность такого анализа всецело зависела от полноты и достоверности справочной информации базы данных.

Однозначность решений подтверждается, например, при оценке состояния газовой фазы по известному уравнению $PV = NRT$, где R – газовая постоянная, V – объем газа. Очевидно, что уравнение содержит именно три независимых параметра состояния, учитываемые здесь как P , T и N .

Техническая реализация данного метода может быть различной. Раньше успешно применялся «константный» вариант его [11, 12] с использованием базы данных [13]. В этом случае «активные» компоненты

расчетной системы устанавливались в зависимости от текущих значений их констант диссоциации и конденсации. В настоящее время принят «энергетический» вариант, отбор активных компонентов в котором выполняется в ходе поиска максимума энтропии системы [14]. Поэтому в данной работе все расчеты выполнялись с помощью программного комплекса Терра [15]. База данных комплекса прошла текущее обновление в 2013 г. из базы ИВТАНТермо [16].

Методика расчетов включала следующие пункты:

– задавались параметры системы P , T и N_j , при этом параметры P и N_j считались постоянными ($P = 0,1013$ МПа, $N_j = \text{const}$ в соответствии с законом сохранения массы элемента);

– выполнялись расчеты мольного состава компонентов системы n_i при варьировании температуры t в диапазоне 25 – 1500 °С с шагом 50 °С;

– на графиках $n_i = f(t)$ выделялись области с интенсивным ростом или спадом содержания компонентов, при этом каждая такая область представлялась как область протекания соответствующей реакции и правильность идентификации области проверялась балансом мольного расхода реагентов с мольным приходом продуктов реакций в ней;

– сводный баланс по всем температурным областям представлял собой краткую характеристику химического процесса в целом.

Таким образом, главная отличительная особенность метода МТА состояла в том, что химические реакции не «предполагались», а «вычислялись». Другие особенности данного алгоритма:

– параметры N_j не будут постоянными величинами, если имеют место стоки продуктов реакций из агрегата до завершения химического процесса, в этом случае каждая стадия процесса анализируется отдельно [17];

– температурные зависимости компонентов реакций $n_i = f(t)$ внутри своих температурных областей в данной работе не рассматриваются, можно лишь сказать, что все они имеют «сигмоидный» тип, характерный, например, для реакции газификации углерода $C + CO_2 = 2CO$ [1 – 5];

– реакции невариантного типа, в отличие от всех прочих, начинаются и заканчиваются при фиксированных температурах, при этом наиболее простой способ определения вариантности реакции w будет по формуле $w = J - c$ [18], где J – число химических элементов, c – число конденсированных компонентов;

– рассчитанные температуры процесса приводятся в градусах Цельсия, как это принято в технической литературе по доменному производству.

Первоначально была предпринята попытка оценить эффективность применения четырех восстановителей: углерода (кокса), оксида углерода, водорода и метана (основного компонента природного газа). Варьируя расходы восстановителей n_i , определяли расчетным путем, какие железосодержащие фазы образуются при 1500 °С, т. е. при максимальной температуре чугуна перед выпуском из печи (табл. 1). Впрочем, практически те же самые результаты можно получить и для температур 1300 – 1400 °С, так как фазовый состав продуктов реакций в этом температурном диапазоне относительно стабильный.

Из табл. 1 следует, что в углеродотермическом процессе при значениях параметра $n = 2,5 - 3$ образуется фаза «чистого» железа, при $n < 2,5$ дополнительно образуются (или сохраняются) кислородсодержащие фазы, а при $n > 3$ образуются углеродсодержащие фазы. Интересно, что в последнем случае расходные характеристики восстановления железа углеродом и метаном становятся идентичными. По-видимому водород, со-

Таблица 1

Железосодержащие продукты реакций при 1500 °С

Table 1. Iron-containing reaction products at 1500 °C

Номер	Система	Реагенты	Параметр n и параметр $\bar{n} = nI$ (в знаменателях) при образовании железосодержащих фаз					Прочие параметры	
			FeO	FeO + Fe	Fe	Fe + Fe ₃ C	Fe ₃ C	n_o	$I = 2,5/n_o$
1	Fe–O–C	Fe ₂ O ₃ + nC	≤ 0,8	0,9 – 2,4	2,5 – 3,0	3,1 – 3,6	≥ 3,7	2,5	1
2		Fe ₂ O ₃ + nCO	$\frac{\leq 4,1}{\leq 0,8}$	$\frac{4,2 - 12,3}{0,8 - 2,5}$	$\frac{\geq 12,4}{\geq 2,5}$	–	–	12,4	0,2
3	Fe–O–H	Fe ₂ O ₃ + nH_2	$\frac{\leq 1,8}{\leq 0,8}$	$\frac{1,9 - 5,5}{0,9 - 2,5}$	$\frac{\geq 5,6}{\geq 2,5}$	–	–	5,6	0,45
4	Fe–O–C–H	Fe ₂ O ₃ + nCH_4	$\frac{\leq 0,4}{\leq 0,8}$	$\frac{0,5 - 1,2}{0,9 - 2,3}$	$\frac{1,3 - 3,0}{2,5}$	3,1 – 3,6	≥ 3,7	1,3	1,9
5		*Fe ₂ O ₃ + $\bar{n}Re$	≤ 0,8	0,9 – 2,4	2,5 – 3,0	3,1 – 3,6	≥ 3,7	–	–

*Re – восстановитель произвольного типа.

держатся в метане, перестает «работать» при высоких расходах метана.

Эффективности восстановителей при невысоких расходах ($n < 2,5$) чрезвычайно различаются, и поэтому необходима методика для единообразной оценки их. Если значение параметра $n_o = 2,5$ для углерода поделить на аналогичные значения других восстановителей, то в итоге получим значения нового параметра I , характеризующего восстановительную активность данного восстановителя по сравнению с таковой для углерода (см. табл. 1). Теперь можно утверждать, что восстановительная активность метана примерно вдвое больше активности углерода, а активность водорода вдвое ее меньше. При использовании единого скорректированного показателя $\bar{n} = nI$ значения расходных характеристик для всех восстановителей становятся практически одинаковыми.

Одновременно было отмечено, что активность метана можно представить аддитивной суммой активностей его составляющих: $I_{CH_4} = I_C + 2I_{H_2} = 1 + 2 \cdot 0,45 = 1,9$. Если аналогичным образом установить восстановительные активности и для прочих компонентов и элементов системы, то в итоге получим следующую сводку их численных значений (отрицательные значения параметра I свидетельствуют о соответствующей окислительной способности этих компонентов):

Компоненты, элементы	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂	H ₂ O	C	O	H
Параметр I	0,20	-0,60	1,90	0,45	-0,35	1,00	-0,80	0,23

Теперь очевидно, что расход любой смеси восстановителей $\bar{n}$ можно определять в едином углеродном эквиваленте на основании информации о значениях параметра I для соответствующих химических элементов системы. Так, для термодинамической системы Fe–C–O–H с исходным элементным составом $\{2, n_C, n_O, n_H\}$ будет справедливым уравнение

$$\begin{aligned} \bar{n} &= I_C n_C + I_O (n_O - 3) + I_H n_H = \\ &= n_C - 0,8(n_O - 3) + 0,23n_H. \end{aligned} \quad (1)$$

Однако для определения фазового состава продуктов реакций по уравнению (1) все равно требуется обращение к табл. 1. Поэтому более удобным в этом случае будет получение нужного решения при заданных значениях относительных концентраций элементов $x_i = \frac{n_i}{n_C + n_O + n_H}$ с помощью фазовой диаграммы на рис. 1. Средняя погрешность прогнозирования фазового состава системы при 1500 °C как по уравнению (1), так и по фазовой диаграмме, не превышает 5 %.

Другой важный и наиболее дискутируемый вопрос связан с определением химического механизма восстановления железа. В табл. 2 приводятся реакции, рассчитанные для четырех ранее рассмотренных

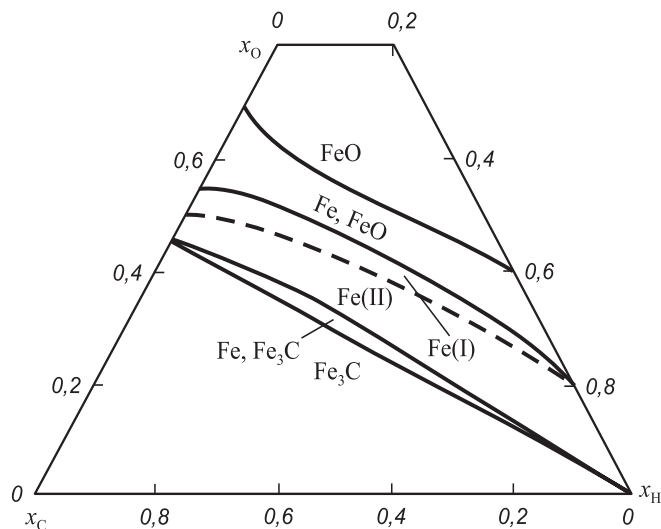


Рис. 1. Фазовая диаграмма железосодержащих продуктов реакций при 1500 °C

Fig. 1. Phase diagram of iron-containing reaction products at 1500 °C

химических процессов с эквивалентными расходами восстановителей $\bar{n} = 2,5 - 3$ моля. Очевидно, что стадия $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4$ будет легко проходить в реальных процессах, поскольку она термодинамически возможна уже при крайне низких температурах. А следующая стадия восстановления во всех процессах должна идти по схеме $Fe_3O_4 \rightarrow Fe$, исключая участие в ней оксида FeO (что, впрочем, допускается авторами работы [2]). При этом магнетит взаимодействует с углеродом, водородом и метаном только прямым способом. Температура восстановления углеродом составляет 680 °C (в работе [19] – 682 °C). Экспериментально подтверждено, что температура восстановления по аналогичной реакции $Fe_3O_4 + 2C = 3Fe + 2CO_2$ составляет 650 °C [20]. Расчетные температуры начала восстановления железа водородом и метаном – 350 и 520 °C соответственно.

Методом МТА не удалось зафиксировать факт косвенного восстановления железа оксидом углерода даже при его больших расходах. Из табл. 2 следует, что он полностью разлагается при обычных температурах с образованием «сажистого» углерода по реакции Белла-Будуара (2.4). Восстановление железа производится этим углеродом по реакции (2.5), т. е. тоже прямым методом. Однако общее балансовое уравнение этого химического процесса формально выглядит как обычное уравнение косвенного восстановления железа, что часто приводит к ошибочным выводам о механизме его восстановления из оксидов газовыми восстановительными смесями.

Избыточный углерод, образовавшийся по реакции (2.4), снова обращается в оксид углерода по обратной реакции (2.6), создавая тем самым десять избыточных молей CO. Но если исходное количество CO сократить хотя бы на 1 моль, то восстановление железа углеродом станет неполным. Точно так же при восста-

Таблица 2

Химические реакции восстановления железа

Table 2. Chemical reactions of iron reduction

Номер	Химический процесс (при 25 – 1500 °C)	Химические реакции			
		$t, ^\circ\text{C}$	Наименование	Номер	w
1	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2,5\text{C} = 2\text{Fe} + 0,5\text{CO}_2 + 2\text{CO}$	65	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 1/6\text{C} = 2/3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 1/6\text{CO}_2$	(2.1)	0
		680	$2/3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 11/6\text{C} = 2\text{Fe} + 5/6\text{CO}_2 + \text{CO}$	(2.2)	0
		680 – 800	$0,5\text{C} + 0,5\text{CO}_2 = \text{CO}$	(2.3)	1
2	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 13\text{CO} = 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2 + 10\text{CO}$	≤ 25	$13\text{CO} = 6,5\text{C} + 6,5\text{CO}_2$	(2.4)	1
		65	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 1/6\text{C} = 2/3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 1/6\text{CO}_2$	(2.5)	0
		300 – 680	$4,5\text{C} + 4,5\text{CO}_2 = 9\text{CO}$	(2.6)	1
		680	$2/3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8/3\text{C} = 2\text{Fe} + 8/3\text{CO}$	(2.7)	0
3	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{H}_2 = 2\text{Fe} + 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2$	≤ 25	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 1/3\text{H}_2 = 2/3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 1/3\text{H}_2\text{O}$	(2.8)	1
		350 – 1050	$2/3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8/3\text{H}_2 = 2\text{Fe} + 8/3\text{H}_2\text{O}$	(2.9)	1
4	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 1,5\text{CH}_4 = 2\text{Fe} + 0,25\text{CO}_2 + 1,25\text{CO} + 1,25\text{H}_2\text{O} + 1,75\text{H}_2$	≤ 25	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 1/6\text{CH}_4 = 2/3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 1/6\text{C} + 1/3\text{H}_2\text{O}$	(2.10)	1
		520 – 680	$2/3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 2/3\text{CH}_4 = 2\text{Fe} + 2/\text{CO}_2 + 4/3\text{H}_2\text{O}$	(2.11)	2

новлении водородом необходимо иметь три избыточных моля H_2 . Эти на первый взгляд «балластные» массы действуют подобно катализаторам процесса – сами непосредственно в восстановительных реакциях не участвуют, но обеспечивают успешное их протекание.

Завершение углеродотермического процесса при температурах 680 – 1500 °C тоже имеет ряд особенностей. В табл. 3 приведен расчет химических реакций, идущих при расходах углерода $\bar{n} = 2 - 3,5$ моля. Здесь так же, как и при низких температурах, периодически

наблюдаются так называемые «неактивные периоды», когда все реакции практически прекращают идти. При температуре выше 1000 °C по реакции (3.2) образуется востит вследствие вторичного окисления диоксидом углерода железа, ранее восстановленного углеродом по реакции (3.1). При расходе $\bar{n} = 3$ моля восстановленное железо обращается в карбид железа по реакции (3.5), но потом снова восстанавливается по реакции (3.6), т. е. в этом случае роль диоксида углерода оказывается положительной. Однако при дальнейшем повышении

Таблица 3

Химические реакции углеродотермического восстановления железа

Table 3. Chemical reactions of carbon-thermal iron reduction

Номер	Химический процесс (при 25 – 1500 °C)	Химические реакции (при 680 – 1500 °C)			
		$t, ^\circ\text{C}$	Наименование	Номер	w
1	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{C} = 1,5\text{Fe} + 0,5\text{FeO} + 0,5\text{CO}_2 + 1,5\text{CO}$	680	$2/3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 16/9\text{C} = 2\text{Fe} + 8/9\text{CO}_2 + 8/9\text{CO}$	(3.1)	0
		680 – 1000	Неактивный период		
		1000 – 1500	$0,5\text{Fe} + 0,5\text{CO}_2 = 0,5\text{FeO} + 0,5\text{CO}$	(3.2)	1
2	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2,5\text{C} = 2\text{Fe} + 0,5\text{CO}_2 + 2\text{CO}$	680	$2/3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 11/6\text{C} = 2\text{Fe} + 5/6\text{CO}_2 + \text{CO}$	(3.3)	0
		800 – 1500	Неактивный период		
3	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{C} = 2\text{Fe} + 3\text{CO}$	680	$2/3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 11/6\text{C} = 2\text{Fe} + 5/6\text{CO}_2 + \text{CO}$	(3.4)	0
		720	$2\text{Fe} + 2/3\text{C} = 2/3\text{Fe}_3\text{C}$	(3.5)	0
		720 – 1150	$2/3\text{Fe}_3\text{C} + 2/3\text{CO}_2 = 2\text{Fe} + 4/3\text{CO}$	(3.6)	1
		1150 – 1500	Неактивный период		
4	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3,5\text{C} = 0,5\text{Fe} + 0,5\text{Fe}_3\text{C} + 3\text{CO}$	680	$2/3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 11/6\text{C} = 2\text{Fe} + 5/6\text{CO}_2 + \text{CO}$	(3.7)	0
		720	$2\text{Fe} + 2/3\text{C} = 2/3\text{Fe}_3\text{C}$	(3.8)	0
		720 – 900	$2/3\text{C} + 2/3\text{CO}_2 = 4/3\text{CO}$	(3.9)	1
		900 – 1500	$1/3\text{Fe}_3\text{C} + 1/6\text{CO}_2 = 0,5\text{Fe} + 1/3\text{CO}$	(3.10)	1

расхода углерода до $\bar{n} = 3,5$ моля свободный диоксид углерода в первую очередь взаимодействует по реакции (3.9) с углеродом, ранее недоиспользованным по реакциям (3.7), (3.8). Поэтому расход его по реакции (3.10) становится недостаточным для полной ликвидации карбида железа.

Результаты анализа углеродотермического процесса восстановления железа обобщены схемой на рис. 2. Здесь так же, как на рис. 1, символами Fe(I) и Fe(II) обозначены соответственно фазы железа, восстановленного однократно (углеродом) и двукратно (углеродом и диоксидом углерода).

Переход к анализу термодинамической системы Fe–O–C–H, дополнительно учитывающей влажность исходных материалов, не вносит принципиальных изменений в приведенную схему восстановления железа, но присутствие в системе водорода вызвало появление новых реакций, а именно реакции паровой газификации углерода, реакции водяного газа, а также реакций образования и последующего разложения метана [21].

Выводы. Разработана методика для определения химических реакций в термодинамических системах с заданным элементарным химическим составом.

Определены основные химические реакции, возникающие при восстановлении железа углеродом, оксидом углерода, водородом и метаном. Дана численная оценка эффективности этих восстановителей.

Предложен алгоритм, позволяющий прогнозировать фазовый состав продуктов восстановления при 1500 °С.

Приведена схема, показывающая последовательность восстановления железа в углеродотермическом процессе.

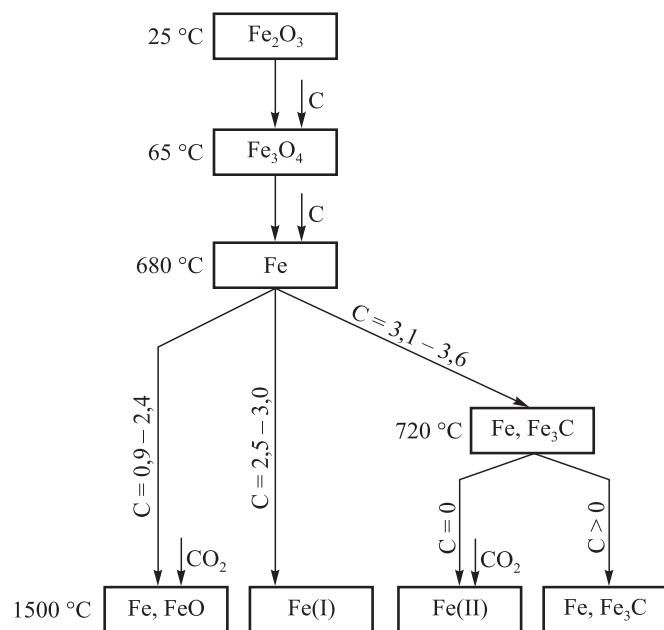


Рис. 2. Схема углеродотермического восстановления железа из гематита

Fig. 2. Scheme of carbon-thermal iron reduction from hematite

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия. – М.: ИКЦ Академкнига, 2005. – 768 с.
2. Металлургия чугуна / Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев, Ю.С. Юсфин и др. – М.: ИКЦ Академкнига, 2004. – 774 с.
3. Pawlow M.A. Metallurgie des Roheisens. Band 3. – Berlin: VEB Verlag Technik, 1953. – 576 p.
4. Peacey J.G., Davenport W.G. Blast Furnace. Theory and Practice. – New York: Pergamon, 1979. – 266 p.
5. Sohn H.Y., Sridhar S., Aune R.E. etc. Fundamentals of Metallurgy. – Cambridge: Boca Raton, 2005. – 589 p.
6. Zhou X.L., Du Z.N. The introduction of COREX process development // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 774 – 776. P. 1430 – 1433.
7. Mower A. etc. The Lion Group & MIDREX Experience: Operational Aspects of Lion's MIDREX HDRI/HBI Plant // Direct from MIDREX. 2nd Quarter, 2009. P. 3 – 7.
8. Ünal H., Turgut E., Atapek S., Alkan A. Direct reduction of ferrous oxides to form an iron-rich alternative charge material // High Temperature Materials and Processes. 2015. Vol. 34. No. 8. P. 751–756.
9. Jones W.D. Fundamental Principles of Powder Metallurgy. – London: Edward Arnold Ltd, 1960. – 1032 p.
10. Зельдович Я.Б. Доказательство единственности решения уравнений закона действующих масс // Журнал физической химии. 1938. Т. 11. № 5. С. 685 – 687.
11. Brinkley S.R. Calculation of equilibrium composition of systems of many constituents // Journal of Chemical Physics. 1947. Vol. 15. No. 2. P. 107 – 110.
12. Бердников В.И. Машинный расчет химического равновесия в многокомпонентных системах // Изв. вуз. Черная металлургия. 1984. № 4. С. 120 – 122.
13. Gurvich L.V., Veitz I.V. etc. Thermodynamic Properties of Individual Substances. 4th ed. in 5 vols. – New York: Hemisphere Pub. Co., 1989.
14. White W.B., Johnson S.M., Dantzig G.B. Chemical equilibrium in complex mixtures // Journal of Chemical Physics. 1958. Vol. 28. No. 5. P. 751 – 755.
15. Трусев Б.Г. База данных и программный комплекс ТЕРРА, редакция 6.3 (электронный ресурс). – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013.
16. Gurvich L.V., Iorish V.S. etc. IVTANTHERMO – a thermodynamic database and software system for the personal computer. – CRC Press Inc., Boca Raton, 1993.
17. Бердников В.И. Применение балансового термодинамического анализа к исследованию механизма восстановления кремния в ферросплавной печи // Сталь. 1991. № 2. С. 42 – 45.
18. Бердников В.И., Гудим Ю.А., Картелева М.И. О применении правила фаз к анализу металлургических процессов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 12. С. 3 – 6.
19. Михайлов Г.Г., Кузнецов Ю.С., Качурина О.И., Чернуха А.С. Анализ фазовых равновесий в системе «оксиды железа – углерод – CO – CO₂» // Вестник ЮУрГУ. Серия Металлургия. 2013. Т. 13. № 1. С. 6 – 13.
20. Третьяков В.Д., Путляев В.И. Введение в химию твердофазных материалов. – М.: Изд. МГУ: Наука, 2006. – 400 с.
21. Кузнецов Ю.С., Качурина О.И. Окислительно-восстановительные свойства газовых фаз (по поводу публикации И.В. Строкиной и Н.Ф. Якушевича. Изменения окислительно-восстановительных свойств газовой фазы системы C–O₂–H₂. Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 6. С. 3 – 5) // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 1. С. 69 – 79.

Поступила в редакцию 1 июля 2019 г.

После доработки 23 июня 2020 г.

Принята к публикации 16 октября 2020 г.

CHEMICAL REACTIONS DURING IRON REDUCTION FROM OXIDES

V.I. Berdnikov¹, Yu.A. Gudim²

¹ LLC Industrial Company “Technology of Metals”, Chelyabinsk, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The chemical process, accompanied by iron reduction from hematite, was modeled by computer program complex TERRA (product of MGTU im. N.E. Bauman). Carbon, hydrogen and methane were used as reducing agents. By varying the costs of reducing agents and process temperatures, equilibrium concentrations of the system components were determined. Change in these concentrations at the boundaries of individual temperature regions was regarded as a result of the passage of appropriate chemical reactions in them. At the same time, it was noted that the nonvariant type reactions begin and end at the same fixed temperatures. Calculations have shown that the conversion of $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ in all cases was thermodynamically possible at temperatures exceeding 65 °C. Therefore, at operating temperatures of the furnace it will be implemented without complications. The second stage of reduction also took place under a single scheme $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}$, bypassing the participation of FeO oxide. The temperatures of beginning of iron reduction by components C, H_2 and CH_4 were respectively 680, 350 and 520 °C. In this case, there was only a direct reduction of iron by these components. An attempt to fix the fact of indirect reduction, using carbon monoxide as a reducing agent, was unsuccessful even with a large consumption of it. Carbon monoxide decomposed at low temperatures by the Bell-Boudoir reaction. Therefore, later iron was restored by means of “soot” carbon and that is also a direct method. In the final stage of the carbon thermal process, depending on the system composition, formation of iron carbide at 720 °C can occur with the possible subsequent conversion back to iron, as well as secondary oxidation of iron to form wustite. Carbon dioxide takes an active part in these reactions. Based on the results of calculations of chemical processes at high temperatures, a numerical assessment of the reducing (or oxidative) efficiency of all elements and components of the Fe–O–C–H system was given. This made it possible to predict with a high degree of reliability the phase composition of the reaction products at maximum process temperature (1500 °C).

Keywords: chemical reaction, iron reduction, hematite, magnetite, carbon monoxide, carbon dioxide, phase diagram, blast furnace.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-842-847

REFERENCES

- Voskoboynikov V.G., Kudrin V.A., Yakushev A.M. *Obshchaya metallurgiya* [General Metallurgy]. Moscow: IKTs Akademkniga, 2005, 768 p. (In Russ.).
- Vegman E.F., Zherebin B.N., Pokhvisnev A.N., Yusfin Yu.S. etc. *Metallurgiya chuguna* [Metallurgy of Cast Iron]. Moscow: IKTs Akademkniga, 2004, 774 p. (In Russ.).
- Pawlow M.A. *Metallurgie des Roheisens*. Band 3. Berlin: VEB Verlag Technik, 1953, 576 p. (In Germ.).
- Peacey J.G., Davenport W.G. *Blast Furnace. Theory and Practice*. New York: Pergamon, 1979, 266 p.
- Sohn H.Y., Sridhar S., Aune R.E. etc. *Fundamentals of Metallurgy*. Cambridge: Boca Raton, 2005, 589 p.
- Zhou X.L., Du Z.N. The introduction of COREX process development. *Advanced Materials Research*. 2013, vol. 774-776, pp. 1430–1433.
- Mouer A. etc. The Lion Group & MIDREX Experience: Operational Aspects of Lion's MIDREX HDRI/HBI Plant. *Direct from MIDREX*. 2nd Quarter, 2009, pp. 3–7.
- Ünal H., Turgut E., Ataapek S., Alkan A. Direct reduction of ferrous oxides to form an iron-rich alternative charge material. *High Temperature Materials and Processes*. 2015, vol. 34, no. 8, pp. 751–756.
- Jones W.D. *Fundamental Principles of Powder Metallurgy*. London: Edward Arnold Ltd, 1960, 1032 p.
- Zel'dovich Ya.B. Proof of uniqueness of the solution of action mass law equations. *Zhurnal fizicheskoi khimii*. 1938, vol. 11, no. 5, pp. 685–687. (In Russ.).
- Brinkley S.R. Calculation of equilibrium composition of systems of many constituents. *Journal of Chemical Physics*. 1947, vol. 15, no. 2, pp. 107–110.
- Berdnikov V.I. Computer calculation of chemical equilibrium in multicomponent systems. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1984, no. 4, pp. 120–122. (In Russ.).
- Gurvich L.V., Veitz I.V. etc. *Thermodynamic Properties of Individual Substances*. In 5 vols. New York: Hemisphere Pub. Co., 1989.
- White W.B., Johnson S.M., Dantzig G.B. Chemical equilibrium in complex mixtures. *Journal of Chemical Physics*. 1958, vol. 28, no. 5, pp. 751–755.
- Trusov B.G. *Baza dannykh i programnyi kompleks Terra, redaktsiya 6.3 (elektronnyi resurs)* [Database and Program Complex TERRA, edition 6.3, (information service)]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2013. (In Russ.).
- Gurvich L.V., Iorish V.S. etc. *IVTANTHERMO – a thermodynamic database and software system for the personal computer*. CRC Press Inc., Boca Raton, 1993.
- Berdnikov V.I. Adaptation of the balance thermodynamic analysis to the mechanism of silicon reduction in a ferroalloy furnace. *Stal'*. 1991, no. 2, pp. 42–45. (In Russ.).
- Berdnikov V.I., Gudim Yu.A., Karteleva M.I. On Gibbs phase rule application to metallurgical process analysis. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 12, pp. 3–6. (In Russ.).
- Mikhailov G.G., Kuznetsov Yu.S., Kachurina O.I., Chernukha A.S. Analysis of phase equilibria in the system “iron oxides – carbon – CO – CO₂”. *Vestnik YuUrGU. Seriya Metallurgiya*. 2013, vol. 13, no. 1, pp. 6–13. (In Russ.).
- Tret'yakov V.D., Putlyayev V.I. *Vvedenie v khimiyu tverdogfaznykh materialov* [Introduction to Chemistry of Solid-Phase Materials]. Moscow: Izd. MGU: Nauka, 2006, 400 p. (In Russ.).
- Kuznetsov Yu.S., Kachurina O.I. Redox properties of the gas phase (On the article of Strokina I.V., Yakushevich N.F. Changes in redox properties of gaseous phase of C–O₂–H₂ system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 6, pp. 3–5). *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 1, pp. 69–79. (In Russ.).

Information about the authors:

V.I. Berdnikov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Senior Researcher (berdnikov-chel@mail.ru)

Yu.A. Gudim, Dr. Sci. (Eng.), Professor

Received July 1, 2019

Revised June 23, 2020

Accepted October 16, 2020

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССА ПРОШИВКИ ТРУБ НА ТПА 70-270 С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Орлов Д.А.^{1,2}, аспирант кафедры «Обработка металлов давлением», главный специалист
по технологии производства бесшовных труб (mr.orlovdmitrii@gmail.com)

Гончарук А.В.¹, д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением» (gon@misis.ru)

Кобелев О.А.³, д.т.н., главный специалист ГК «РОСАТОМ» (oakobelev@cnitmash.com)

Комарницкая О.Г.¹, бакалавр кафедры «Обработка металлов
давлением» (okomarnitskaia@gmail.com)

Буниц Н.С.¹, магистр кафедры «Обработка металлов давлением» (1thewall1@gmail.com)

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

² АО «Выксунский металлургический завод»
(607060, Россия, Нижегородская обл., Выкса, ул. Бр. Баташевых, 45)

³ Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения, ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»
(115088, Россия, Москва, Шарикоподшипниковская ул., 4)

Аннотация. Проведен анализ процесса прошивки и раскатки труб на ТПА 70-270 АО «Выксунский металлургический завод» с точки зрения энергосиловых параметров (ЭСП), времени прошивки и геометрических размеров труб. Выполнено сопоставление полученных результатов с результатами компьютерного моделирования в программном комплексе QFORM 3D. Для моделирования спроектированы очаги деформации для прошивки гильзы размерами 203×16,5 мм за один проход на оправке диам. 162 мм и за две операции прошивки и раскатки на оправках диам. 76 и 162 мм соответственно. Из полученных данных по энергосиловым параметрам установлено, что с точки зрения энергозатрат прошивка в один проход на оправке диам. 162 мм представляется более целесообразной. Однако при прошивке за одну операцию резко снижается износостойкость оправок, так как увеличивается время контакта между инструментом и горячим металлом. Это приводит к снижению качества внутренней поверхности гильз и труб, более частой замене инструмента и повышению простоев оборудования. При моделировании выбранный параметр фактора трения оказывает значительное влияние на значение энергосиловых параметров (крутящего момента и потребляемой мощности) и времени прошивки. Получены зависимости изменения энергосиловых параметров и времени прошивки от фактора трения при прошивке в двухвалковом стане с направляющими линейками. С возрастанием фактора трения снижается время прошивки и увеличиваются момент и мощность прокатки. Результаты моделирования коррелируются с экспериментальными результатами опытных прокаток. При правильно выбранном значении фактора трения ЭСП, время прокатки и геометрия гильзы могут быть с достаточной точностью спрогнозированы при помощи компьютерного моделирования.

Ключевые слова: прошивка, раскатка, винтовая прокатка, мощность прокатки, очаг деформации, метод конечных элементов (МКЭ), фактор трения.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-848-855

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современной рыночной ситуации трубные предприятия вынуждены постоянно развивать технологию производства, совершенствовать качество продукции и расширять размерный и марочный сортамент [1]. При освоении новых типоразмеров труб необходимы разработка режимов деформации, проектирование калибровок инструмента, оценка возможности производства на имеющемся технологическом оборудовании и другие инженерные расчеты [2 – 4].

В последние годы инженерно-технические центры предприятий и исследовательские институты широко используют в своей работе программные комплексы на основе конечно-элементного моделирования [5, 6].

С одной стороны, это позволяет на первоначальном этапе провести оценку принимаемых решений, проанализировать формоизменение при использовании новых калибровок, энергосиловые параметры и другие условия процесса деформации. С другой стороны, адекватность результатов расчета во многом зависит от используемых исходных параметров [7]. Поэтому для каждого процесса необходима верификация полученных результатов путем их сопоставления с результатами реального процесса. Имея данные опытных или промышленных прокаток возможно настроить расчетную модель и использовать ее в дальнейшем для проверки новых разработок. Результаты многочисленных исследований, опубликованные в периодических научных изданиях, подтверждают обоснованность и перс-

пективность применения программ для моделирования процессов ОМД [8, 9]. В работе [10] проводилось моделирование процесса прошивки на стане винтовой прокатки с направляющими дисками. На основе компьютерного моделирования процесса раскатки труб в трехвалковом стане винтовой прокатки в QFORM выполнялись исследования формоизменения металла в очаге деформации [11]. В работе [12] рассмотрены особенности износа валков и оправок прошивного стана с применением компьютерного моделирования. Кроме анализа энергосиловых параметров [13] и особенностей формоизменения, компьютерное моделирование также применяют для предсказания разрушения во время деформации [14] и формирования микроструктуры [15].

В 2008 г. на АО «Выксунский металлургический завод» (ВМЗ) в составе ТЭЦ № 3 введен в строй действующих участок ТПА 70-270 производства горячедеформированных труб, используемых при изготовлении муфт для труб нефтяного сортамента [16]. Данный ТПА имеет возможность увеличения производительности до 50 тыс. т в год.

Целью данной работы является анализ процесса горячей прокатки труб и сравнение результатов моделирования с результатами реального процесса при изменении фактора трения.

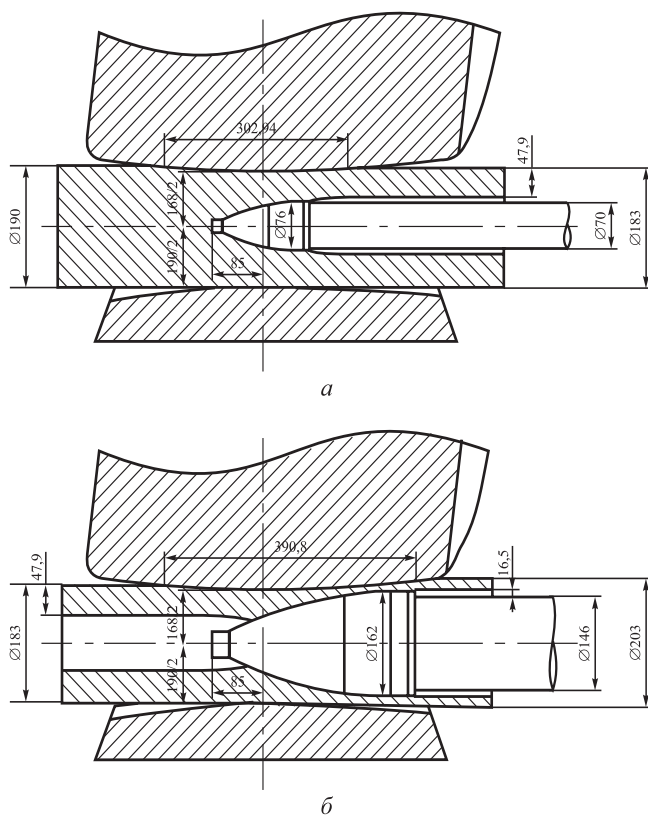


Рис. 1. Схема настройки очага деформации при прошивке (а) и раскатке (б)

Fig. 1. Scheme of deformation zone setting parameters for piercing (a) and rolling-off (b)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ ТРУБ НА ТПА 70-270

Экспериментальные исследования процесса прокатки бесшовных труб проводились на ТПА 70-270 АО «ВМЗ» [17 – 19]. Для проведения опытных прокаток и сравнения экспериментальных данных с результатами моделирования выбран типоразмер труб диам. 203 мм с толщиной стенки 16,5 мм. Для получения данной трубы были спроектированы очаги деформации прошивного/раскатного стана с возможностью получения за одну, либо за две операции прошивки прошивку и раскатку (рис. 1, 2).

В качестве исходной была использована заготовка из стали марки 45 диам. 190 мм. Перед прошивкой заготовки нагревали в печи с шагающим подом до температуры 1180 °С. Суммарное время нагрева составляло 2,5 ч.

Процесс прокатки протекал стабильно, без нарушения первичного и вторичного захвата. В процессе проведения эксперимента контролировали геометрические размеры полученных труб, время прокатки и энергосиловые параметры процесса (крутящий момент и потребляемую мощность прокатки).

В табл. 1 представлены размеры полученных гильз и труб после прошивки и раскатки.

При прошивке на оправке меньшего диаметра устойчивость стержня меньше, поэтому средняя разностенность после первого прохода выше, однако на конечных трубах разностенность одинаковая.

На рис. 3, 4 представлены графики крутящего момента на рабочем валке и потребляемой мощности при прошивке и раскатке труб, полученные из системы управления частотными преобразователями главного привода прошивного стана.

При прошивке на оправке диам. 76 мм крутящий момент на одном валке при установившемся режиме составил в среднем 110 – 125 кН·м, мощность прокатки – 650 – 800 кВт. Графики изменения момента и мощ-

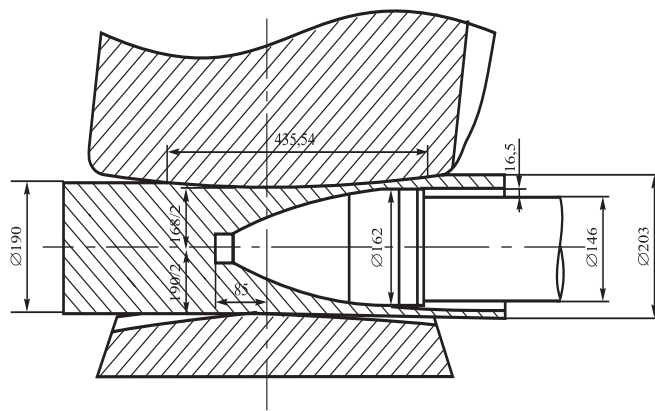


Рис. 2. Схема настройки очага деформации при прошивке в одну операцию

Fig. 2. Scheme of deformation zone setting parameters for piercing in one pass

Геометрические размеры гильз и труб после экспериментальной прокатки на ТПА 70-270

Table 1. Geometric dimensions of the mold tubes and pipes after experimental rolling on PRP 70-270

Показатель	Наружный диаметр гильзы/трубы, мм	Толщина стенки гильзы/трубы, мм	Средняя разностенность гильзы/трубы, мм
Прошивка на оправке диам. 76 мм	183	47,3	2,7
Раскатка на оправке диам. 162 мм	203	16,5	1,2
Прошивка на оправке диам. 162 мм	203	16,5	1,2

ности прокатки имеют характерный вид с интенсивным ростом и снижением значений при заполнении и освождении очага деформации соответственно. Установившаяся стадия прошивки занимает приблизительно 8 с, а весь процесс – 13 с.

В процессе раскатки прошивной гильзы на оправке диам. 162 мм значения крутящего момента и мощности возрастают и составляют для одного валка на установившейся стадии 125 – 150 кН·м и 850 – 950 кВт соответственно. Увеличение энергосиловых параметров в данном случае объясняется некоторым снижением температуры гильзы и увеличением площади контактной поверхности между валком и заготовкой.

Суммарное время раскатки составило приблизительно 23 с, а время установившейся фазы – 15 с.

На рис. 5 представлены графики крутящего момента и потребляемой мощности при прошивке в один проход на оправке диам. 162 мм.

Суммарное время прошивки в данном случае составило 25 с, а время установившейся стадии процесса – 17 с. Максимальные момент и мощность прокатки наблюдаются в конце установившейся стадии и составляют 125 – 150 кН·м и 780 – 900 кВт соответственно.

Во всех случаях можно отметить разницу в энергосиловых параметрах для левого и правого валка, которая достигает 25 кН·м для крутящего момента

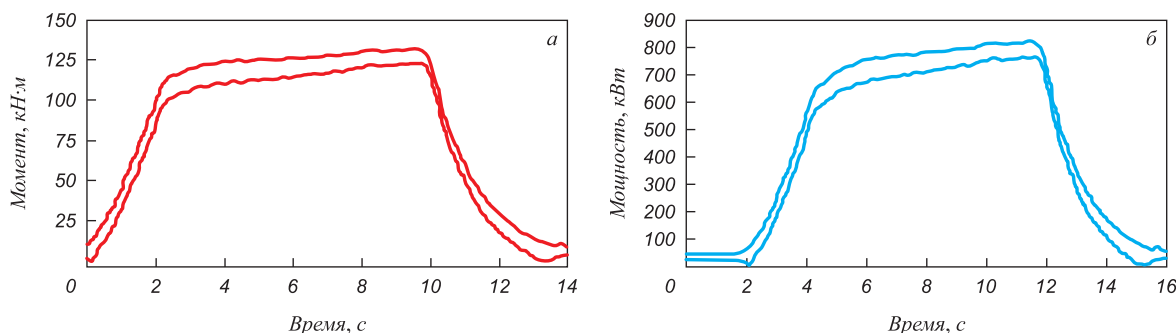


Рис. 3. Крутящий момент (а) и потребляемая мощность (б) при прошивке заготовок диам. 190 мм на оправке диам. 76 мм. На левый валок (по ходу прокатки) нагрузка выше

Fig. 3. Torque (a) and power consumption (b) for piercing billets with diameter of 190 mm on mandrel with diameter of 76 mm. On the left mill roll (during piercing) the load is higher

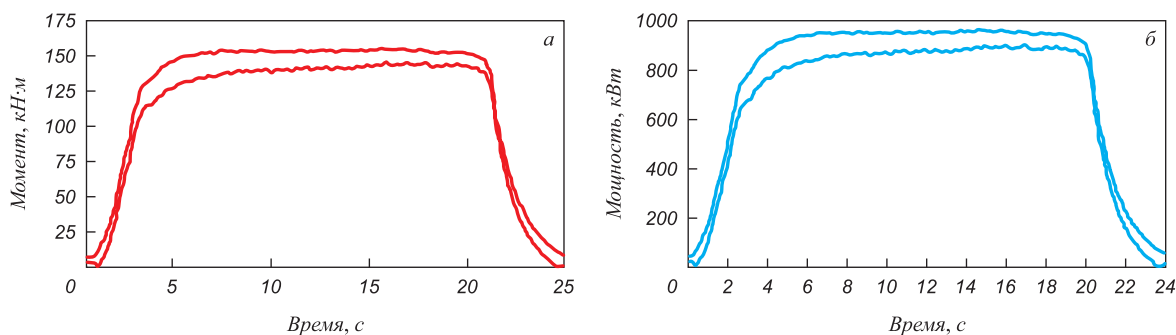


Рис. 4. Крутящий момент (а) и потребляемая мощность (б) при раскатке гильзы на оправке диам. 162 мм. На левый валок (по ходу прокатки) нагрузка выше

Fig. 4. Torque (a) and power consumption (b) for rolling-off the mold tube on mandrel with diameter of 162 mm. On the left mill roll (during piercing) the load is higher

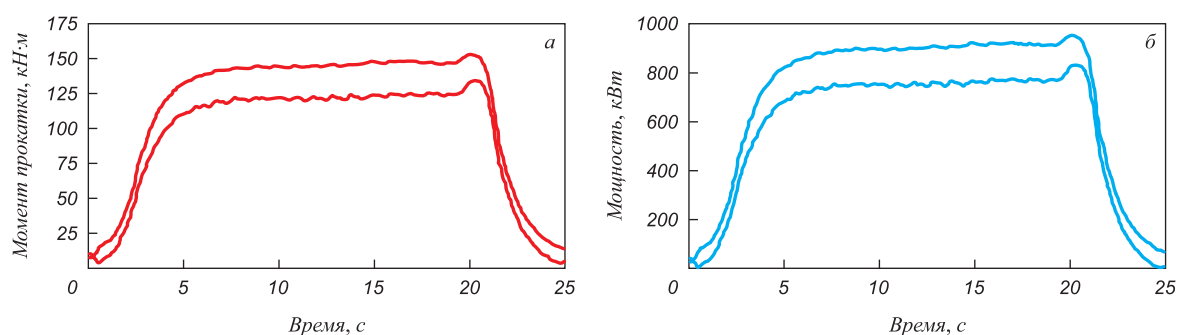


Рис. 5. Момент (а) и мощность (б) прокатки при прошивке на оправке диам. 162 мм.
На левый валок (по ходу прокатки) нагрузка выше

Fig. 5. Rolling torque (a) and power (b) for piercing on mandrel with diameter of 162 mm.
On the left mill roll (during piercing) the load is higher

и 150 кВт по мощности. Данный факт может быть связан с несимметричной настройкой очага деформации или различиями условий трения в узлах главного привода (шпиндельных устройствах или редукторах) и на контакте металла с рабочими валками.

Из полученных данных по энергосиловым параметрам можно заключить, что с точки зрения энергозатрат прошивка в один проход на оправке диам. 162 мм представляется более целесообразной. Однако при прошивке за одну операцию резко снижается износостойкость оправок, так как увеличивается время контакта между инструментом и горячим металлом [1, 12]. Это приводит к снижению качества внутренней поверхности гильз и труб, более частой замене инструмента и повышению простоев оборудования. Данные факторы также должны учитываться при выборе режимов деформации.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОШИВКИ И РАСКАТКИ

Моделирование процесса прошивки выполнялось в QFORM 3D [20] в полном соответствии с реальными размерами рабочего инструмента прошивного/раскатного стана и параметрами настройки очагов деформации (см. рис. 1, 2).

Основные исходные параметры, принятые при моделировании, представлены в табл. 2.

В зависимости от изменения фактора трения между рабочими валками и заготовкой анализировались изменения ЭСП и размеров получаемых гильз, а также время прокатки. Для проведения моделирования были созданы трехмерные модели очагов деформации в соответствии с выбранными параметрами настройки (рис. 6).

Таблица 2

Исходные данные для моделирования процесса прошивки и раскатки

Table 2. Source data for modeling piercing and rolling-off process

Параметр	Значение
Материал заготовки	Сталь 45
Температура нагрева заготовки, °C	1180
Размеры исходной заготовки, мм	
– диаметр	190
– длина	2110
Материал рабочих валков	40X
Материал оправки и линеек	4X5МФС
Температура инструмента, °C	50
Частота вращения рабочих валков, об/мин	60
Угол подачи, град	12
Угол раскатки, град	5
Условия трения между валками и заготовкой	var (по закону Зибеля)
Условия трения между оправкой и заготовкой (фактор трения)	Без смазки (0,8 по закону Леванова)
Условия трения между линейками и заготовкой (фактор трения)	Без смазки (0,8 по закону Леванова)

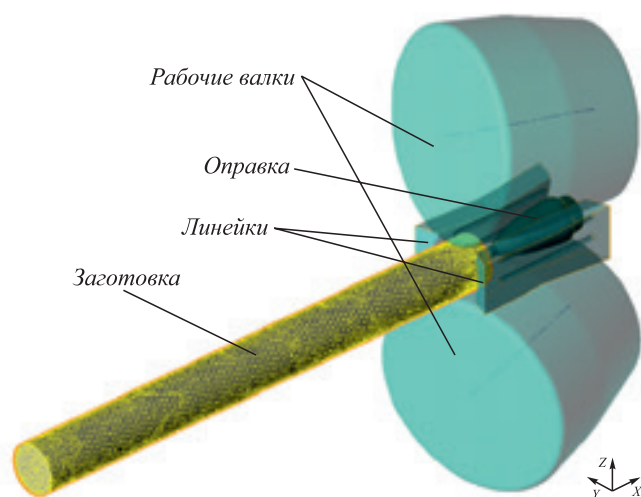


Рис. 6. Трехмерная модель очага деформации для прошивки заготовки

Fig. 6. Three-dimensional model of deformation zone for piercing process

На входе и выходе из очага деформации имеются виртуальные проводки, обеспечивающие удержание заготовки и гильзы на оси прокатки.

Изначально для сравнения выбрано три разных фактора трения при прошивке: 0,9; 1,0 и 1,5. Далее, исходя из полученных результатов, добавлялись промежуточные варианты значений фактора трения (0,95 и 1,2). Для анализа полученные параметры сведены в табл. 3.

Стоит отметить, что заготовка полномасштабной модели очага деформации, использованной для моделирования, имеет более 100 тыс. элементов, что необходимо для получения приемлемой точности расчетов. В связи с этим, расчет одного варианта на компьютере средней мощности может занимать порядка 25 – 60 ч. Поэтому для сокращения временных затрат необходимо правильно задавать исходные условия задачи и иметь данные о предпочтительных значениях параметров, оказывающих значительное влияние на результат.

Как видно, изменение условий трения между рабочим инструментом и заготовкой при моделировании существенно влияет на значение энергосиловых параметров и время прошивки. Наиболее близкие значения момента и мощности прошивки при моделировании и проведении эксперимента получены при факторе трения 0,9. Однако при этом время прошивки при моделировании составило 16,51 с, что на 2,5 с больше. Наиболее близкое время прошивки при моделировании (13 с) и проведении эксперимента в промышленных условиях (14 с) получено при факторе трения 0,95, но в то же время происходит повышение момента на 20,4 кН·м и мощности на 107 кВт. Дальнейшее увеличение фактора трения приводит к росту момента и мощности, а также уменьшению времени прошивки (рис. 7).

Измерения размеров гильз, полученных после моделирования прошивки, показали, что фактор трения не оказывает существенного влияния на геометрические размеры (см. табл. 3). Максимальная разница по наружному диаметру D составила менее 2 мм, а разница по толщине стенки S не более 0,7 мм. Разница в размерах объясняется механизмом перестроения сетки конечных элементов при расчете и может быть снижена при помощи увеличения количества конечных элементов сетки заготовки.

Различие в размерах полученных гильз при проведении пробных прокаток и при моделировании более существенное и составляет по диаметру до 6 мм, по толщине стенки до 2,5 мм. По результатам моделирования гильза после прошивки имеет меньший диаметр и большую толщину стенки. Таким образом, существует разница в условиях радиальной раскатки гильзы на конусе оправки и в выходном конусе вала. Отличия в размерах возможно объяснить различиями в температурных условиях модели и реального процесса. Для сокращения времени расчета при моделировании задано «простое» условие теплообмена между заготовкой и инструментом, т. е. на контакте с инструментом решается упрощенная совместная тепловая задача. При этом

Таблица 3

Результаты измерения параметров процесса прошивки в зависимости от фактора трения (прошивка на оправке диам. 76 мм)

Table 3. Results of measuring the parameters of piercing process depending on the friction factor (piercing on mandrel with diameter of 76 mm)

Фактор трения (по Зибелю)	Момент, кН·м	Мощность, кВт	Размеры гильзы, мм		Время прошивки, с
			D	S	
0,9	126,4	800	176,95	49,72	16,51
0,95	146,8	907	178,11	50,37	13,02
1,0	149,6	940	178,83	50,42	12,58
1,2	164,9	1034	178,18	49,89	10,77
1,5	177	1100	178,89	49,75	10,12

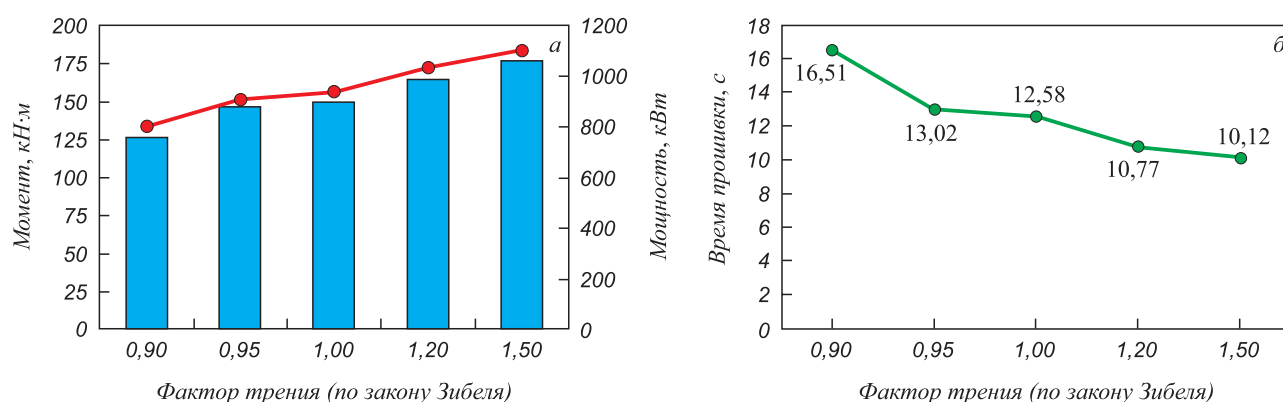


Рис. 7. Зависимость изменения момента (■) и мощности (—) прошивки (а) и времени (—) прошивки (б) от фактора трения

Fig. 7. Dependence of change in torque (■) and power (—) of piercing (a) and piercing time (—) (б) on the friction factor

изменение температуры инструмента рассчитывается только на контактирующей с заготовкой поверхности.

После завершения моделирования процесса прошивки полученная гильза импортировалась в следующую операцию для моделирования раскатки на оправке диам. 162 мм. При этом температурное поле гильзы не сохранялось; начальная температура нагрева была задана равной 1180 °С, что соответствует условиям эксперимента в промышленных условиях. Результаты полученных параметров представлены в табл. 4.

Как видно, время раскатки, практически совпадающее с реальным процессом, получено при факторе трения 0,8. Однако значения момента и мощности прокатки отказались заниженными в 2 – 2,5 раза относительно экспериментальных данных, полученных на стане. Такие различия, по-видимому, связаны с тем, что размеры

гильзы после прошивки в QFORM меньше расчетных, что привело к уменьшению площади контакта между валком и заготовкой.

При прошивке в один проход на оправке диам. 162 мм значительно возрастает длина очага деформации и сопротивление осевому перемещению заготовки со стороны оправки, поэтому можно предположить, что потребуется более высокий показатель трения для стабильного протекания процесса прошивки. Действительно, во всем диапазоне изменения фактора трения 0,9 – 1,5 при вторичном захвате наблюдалось проскальзывание заготовки и отсутствие осевого перемещения.

При факторе трения 3,0 процесс прошивки протекал стабильно. Полученные значения момента и мощности прошивки (табл. 5) находятся в диапазоне значений, зафиксированных системой мониторинга при опытной

Таблица 4

Результаты измерения параметров процесса раскатки (раскатка на оправке диам. 162 мм)

Table 4. Results of measuring the parameters of rolling-off process (rolling-off on mandrel with diameter of 162 mm)

Фактор трения (по Зибелю)	Момент, кН·м	Мощность, кВт	Размеры гильзы, мм		Время раскатки, с
			D	S	
0,8	60	400	201,5	17	24,9

Таблица 5

Результаты измерения параметров процесса прошивки в зависимости от фактора трения (прошивка на оправке диам. 162 мм)

Table 5. Results of measuring the parameters of piercing process depending on the friction factor (piercing on mandrel with diameter of 162 mm)

Фактор трения (по Зибелю)	Момент, кН·м	Мощность, кВт	Размеры гильзы, мм		Время прошивки, с
			D	S	
2,5	105,7	664	200,2	17,2	21,6 (остановка процесса с 18 с)
3,0	141,7	890	201,6	17,5	19,5

прошивке (см. рис. 5). При этом время прошивки составило примерно 19,5 с, что на 4,5 с меньше, чем в реальном процессе.

Размеры гильзы также незначительно отличаются от полученных в условиях производства: разница в наружном диаметре составила 2 мм, по толщине стенки – 0,7 мм.

Для приближения к реальному процессу по параметру времени прошивки фактор трения был уменьшен до 2,5. Однако в данном случае с момента начала освобождения очага деформации гильза начала вращаться без осевого перемещения вдоль оси прокатки, поэтому дальнейший расчет не продолжался.

Таким образом, при моделировании процесса прошивки в QFORM с увеличением фактора трения возрастают ЭСП и снижается время прокатки. Кроме того, на условия протекания процесса влияет форма рабочего инструмента, в частности, диаметр и форма оправки. В общем случае исходные параметры, такие как параметр трения между инструментом и заготовкой, размер сетки конечных элементов, условия теплообмена не могут быть приняты универсальными для всех вариантов настройки оборудования и должны подбираться, исходя из поставленной задачи.

Выводы

Проведены анализ процесса прошивки и раскатки труб на ТПА 70-270 АО «ВМЗ» и сопоставление полученных результатов с результатами компьютерного моделирования в QFORM.

В производственных условиях получены трубы наружным диам. 183 мм с толщиной стенки 16,5 мм за один проход на оправке диам. 162 мм и за два прохода (прошивка и раскатка) на оправках диам. 76 мм и 162 мм.

Смоделирован процесс прошивки по выбранным параметрам в QFORM 3D. Условия трения между заготовкой и рабочим инструментом оказывают существенное влияние на результаты моделирования. При повышении фактора трения возрастают ЭСП и снижается время прокатки.

Результаты моделирования коррелируются с экспериментальными результатами опытных прокаток. При правильно выбранном значении фактора трения ЭСП, время прокатки и геометрия гильзы могут быть с достаточной точностью спрогнозированы при помощи компьютерного моделирования.

Полученные данные можно использовать для анализа и в инженерных расчетах при проектировании нового рабочего инструмента, выбора деформационных параметров или освоении новых типоразмеров труб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Romantsev B., Goncharuk A., Aleshchenko A. etc. Development of multipass skew rolling technology for stainless steel and alloy pipes' production // *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 97. No. 9 – 12. P. 3223 – 3230.
- Романцев Б.А., Гончарук А.В., Алешченко А.С. и др. Совершенствование режимов горячей прокатки труб на мини ТПА 70-270 // *Металлург*. 2015. № 5. С. 41 – 43.
- Гончарук А.В., Романцев Б.А., Орлов Д.А., Гамин Ю.В. Влияние режимов деформации на точность бесшовных труб // *Технология металлов*. 2020. № 1. С. 50 – 54.
- Гамин Ю.В., Романцев Б.А., Пашков А.Н. и др. Получение полых полуфабрикатов изделий из медных сплавов электротехнического назначения способом винтовой прокатки // *Изв. вуз. Цветная металлургия*. 2020. № 1. С. 27 – 38.
- Deng G.Y., Zhu Q., Tieu K. etc. Evolution of microstructure, temperature and stress in a high speed steel work roll during hot rolling: Experiment and modeling // *Journal of Material Processing Technology*. 2017. Vol. 240. P. 200 – 208.
- Yang J., Li S., Liu J. etc. Finite element analysis of bending behavior and strain heterogeneity in snake rolling of AA7050 plates using a hyperbolic sine-type constitutive law // *Journal of Materials Processing Technology*. 2017. Vol. 240. P. 274 – 283.
- Zhang Z., Liu D., Yang Y. etc. Microstructure evolution of nickel-based superalloy with periodic thermal parameters during rotary tube piercing process // *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 104. No. 9 – 12. P. 3991 – 4006.
- Галкин С.П., Романцев Б.А., Та Динь Суан, Гамин Ю.В. Ресурсосберегающая технология производства круглого сортового проката из бывших в употреблении осей подвижного железнодорожного состава // *Черные металлы*. 2018. № 4. С. 20 – 27.
- Toporov V., Bogatov A., Nukhov D. Study of the tubular billets geometric characteristics during computer simulation of the rotary piercing process // *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 946. P. 788 – 793.
- Pater Z., Bartnicki J., Kazanecki J. 3D finite elements method (FEM) analysis of basic process parameters in rotary piercing mill // *Metallurgija*. 2012. Vol. 51. No. 4. P. 501 – 504.
- Алешченко А.С., Будников А.С., Харитонов Е.А. Исследование формоизменения металла в процессе редуцирования труб на трехвалковом стане // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 10. С. 756 – 762.
- Алешченко А.С., Гамин Ю.В., Чан Б.Х., Цюцюра В.Ю. Особенности износа рабочего инструмента при прошивке жаропрочных сплавов // *Черные металлы*. 2018. № 8. С. 63 – 70.
- Pater Z. FEM analysis of loads and torque in a skew rolling process for producing axisymmetric parts // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2017. Vol. 62. No. 1. P. 85 – 90.
- Скрипаленко М.М., Галкин С.П., Хе Чже Сун и др. Прогнозирование вероятного разрушения при радиально-сдвиговой прокатке непрерывнолитых медных заготовок на основе компьютерного моделирования // *Металлург*. 2018. № 9. С. 7 – 12.
- Huo Y., He T., Wang B. etc. Numerical prediction and experimental validation of the microstructure of bearing steel ball formation in warm skew rolling // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2020. Vol. 51. No. 3. P. 1254 – 1263.
- Romantsev B.A., Goncharuk A.V., Zimin V.Y. etc. Introducing seamless-pipe production at OAO Vyskuns'kii metallurgicheskii zavod // *Steel in Translation*. 2009. Vol. 39. No. 9. P. 803 – 805.
- Romantsev B.A. New technology for pipe rolling on mini mills // *Steel in Translation*. 2011. Vol. 41. No. 12. P. 1019 – 1024.
- Романенко В.П., Степанов П.П., Крикович С.М. Производство полых вагонных осей методами винтовой прошивки и радиальнойковки // *Металлург*. 2017. № 10. С. 44 – 48.
- Романенко В.П., Фомин А.В., Севастьянов А.А., Никулин А.Н. Исследование механических свойств железнодорожных колес, полученных из заготовки, проштампованной в стане винтовой прокатки // *Металлург*. 2018. № 6. С. 73 – 77.
- Quantor Form 2019. URL: <https://qform3d.com> (Access date: 09.02.2020).

Поступила в редакцию 26 февраля 2020 г.
После доработки 1 апреля 2020 г.
Принята к публикации 20 сентября 2020 г.

ANALYSIS OF PIPE PIERCING ON PRP 70-270 WITH FEM MODELING

D.A. Orlov^{1,2}, A.V. Goncharuk¹, O.A. Kobelev³, O.G. Komarnitskaya¹, N.S. Bunits¹

¹ National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

² JSC “Vyksa Metallurgical Plant”, Vyksa, Nizhny Novgorod Region, Russia

³ JSC Russian State Research Center “CNIITMASH”, Moscow, Russia

Abstract. The article analyzes the piercing and rolling process of seamless pipes on PRP 70-270 of JSC “VMP” in terms of power parameters, piercing time and geometric sizes of pipes. The research results were compared with the results of computer simulation on software package QFORM 3D. For simulation, the deformation zones were designed for piercing a mold tube with dimensions of 203×16.5 mm in one pass on a mandrel with diameter of 162 mm and in two passes of piercing and rolling-off on mandrels with diameter of 76 and 162 mm, respectively. From the obtained data on the power parameters, it was found that from the point of view of energy consumption, piercing in one pass seems more appropriate. However, when piercing in one pass, wear resistance of the mandrels sharply decreases, since the contact time between the tool and the hot metal increases. This leads to a decrease in quality of the pipes’ inner surface, more frequent replacement of the tool and increased downtime of the equipment. During simulation, the selected parameter of the friction factor has a significant impact on the value of power parameters (torque and power consumption) and piercing time. The dependences of changing power parameters and piercing time on the friction factor during piercing in a two-roll mill with guards are obtained. With increase of the friction factor, piercing time decreases and torque and rolling power increase. The simulation results are correlated with results of experimental rolling. With a correctly chosen value of the friction factor, power parameters and geometry of the mold tube can be quite accurately predicted by computer modeling.

Keywords: piercing, rolling, screw rolling, rolling power, deformation zone, finite elements method (FEM), friction factor.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-848-855

REFERENCES

- Romantsev B., Goncharuk A., Aleshchenko A., Gamin Y., Mintakhanov M. Development of multipass skew rolling technology for stainless steel and alloy pipes’ production. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, vol. 97, no. 9-12, pp. 3223–3230.
- Romantsev B.A., Goncharuk A.V., Aleshchenko A.S., Onuchin A.B., Gamin Y.V. Improving the regimes used for hot-rolling tubes on mini tube-production unit 70–270. *Metallurgist*. 2015, vol. 59, no. 5-6, pp. 386–389.
- Goncharuk A.V., Romantsev B.A., Orlov D.A., Gamin Yu.V. Influence of deformation modes on accuracy of seamless pipes. *Tekhnologiya metallov*. 2020, no. 1, pp. 50–54. (In Russ.).
- Gamin Y.V., Romantsev B.A., Pashkov A.N., Patrino P.V., Bystrov I.A., Fomin A.V., Kadach M.V. Obtaining hollow semifinished products based on copper alloys for electrical purposes by means of screw rolling. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2020, vol. 61, no. 2, pp. 162–171.
- Deng G.Y., Zhu Q., Tieu K. etc. Evolution of microstructure, temperature and stress in a high speed steel work roll during hot rolling: Experiment and modeling. *Journal of Material Processing Technology*. 2017, vol. 240, pp. 200–208.
- Yang J., Li S., Liu J., Li X., Zhang X. Finite element analysis of bending behavior and strain heterogeneity in snake rolling of AA7050 plates using a hyperbolic sine-type constitutive law. *Journal of Material Processing Technology*. 2017, vol. 240, pp. 274–283.
- Zhang, Z., Liu, D., Yang, Y. etc. Microstructure evolution of nickel-based superalloy with periodic thermal parameters during rotary tube piercing process. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019, vol. 104, no. 9-12, pp. 3991–4006.
- Galkin S.P., Romantsev B.A., Ta D.X., Gamin Yu.V. Resource-saving technology for production of round bars from used shaft of rolling railroad stock. *Chernye metally*. 2018, no. 4, pp. 20–27. (In Russ.).
- Toporov V., Bogatov A., Nukhov D. Study of the tubular billets geometric characteristics during computer simulation of the rotary piercing process. *Materials Science Forum*. 2019, vol. 946, pp. 788–793.
- Pater Z., Bartnicki J., Kazanecki J. 3D finite elements method (FEM) analysis of basic process parameters in rotary piercing mill. *Metallurgija*. 2012, vol. 51, no. 4, pp. 501–504.
- Aleshchenko A.S., Budnikov A.S., Kharitonov E.A. Metal forming during pipes reduction on a three-high rolling mill. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 10, pp. 756–762. (In Russ.).
- Aleshchenko A.S., Gamin Y.V., Chan B.K., Tsyutsyura V.Y. Wear features of working tools during piercing of high-temperature alloys. *Chernye metally*. 2018, no. 8, pp. 63–70. (In Russ.).
- Pater Z. FEM analysis of loads and torque in a skew rolling process for producing axisymmetric parts. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2017, vol. 62, no. 1, pp. 85–90.
- Skipalenko M.M., Galkin S.P., Sung H.J. etc. Prediction of potential fracturing during radial-shear rolling of continuously cast copper billets by means of computer simulation. *Metallurgist*. 2019, vol. 62, no. 9-10, pp. 849–856.
- Huo Y., He T., Wang B. etc. Numerical prediction and experimental validation of the microstructure of bearing steel ball formation in warm skew rolling. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2020, vol. 51, no. 3, pp. 1254–1263.
- Romantsev B.A., Goncharuk A.V., Zimin V.Y., Pakhomov V.P., Aleshchenko A.S., Matyko O.K. Introducing seamless-pipe production at OAO Vyksunskii metallurgicheskii zavod. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. 9, pp. 803–805.
- Romantsev B.A. New technology for pipe rolling on mini mills. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 12, pp. 1019–1024.
- Romanenko V.P., Stepanov P.P., Kriskovich S.M. Production of hollow railroad axles by screw piercing and radial forging. *Metallurgist*. 2018, vol. 61, no. 9-10, pp. 873–877.
- Romanenko V.P., Fomin A.V., Sevast’yanov A.A. etc. A Study of the mechanical properties of railroad wheels manufactured from a billet broached in a helical rolling mill. *Metallurgist*. 2018, vol. 62, no. 5-6, pp. 568–573.
- QuantorForm2019. Available at URL: <https://qform3d.com> (Accessed: 09.02.2020).

Information about the authors:

D.A. Orlov, Postgraduate of the Chair “Metal Forming”, Chief Specialist of Seamless Pipe Production Technology
(mr.orlovdmiriii@gmail.com)

A.V. Goncharuk, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metal Forming” (gon@mis.ru)

O.A. Kobelev, Dr. Sci. (Eng.), Chief Specialist of State Corporation “ROSATOM” (oakobelev@cniitmash.com)

O.G. Komarnitskaya, Bachelor of the Chair “Metal Forming” (okomarnitskaia@gmail.com)

N.S. Bunits, Master Student of the Chair “Metal Forming” (1thewall1@gmail.com)

Received February 26, 2020

Revised April 1, 2020

Accepted October 20, 2020

УДК 621.745.56:666.9.012

АНАЛИЗ И КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАМЕРОВ ТЕМПЕРАТУРЫ, ВЫПОЛНЕННЫХ В ПРОЦЕССЕ ПЛАВКИ И РАЗЛИВКИ СПЛАВОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Федосов А.В.^{1,2}, к.т.н., доцент кафедры «Технологии формообразования
и художественная обработка материалов» (fedosov-sol@mail.ru)

Чумаченко Г.В.¹, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Технологии формообразования
и художественная обработка материалов» (gchumachenko@dstu.edu.ru)

¹ Донской государственный технический университет
(344010, Россия, Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1)

² ООО «Ростовский литейный завод»
(344029, Россия, Ростов-на-Дону, ул. Менжинского, 2)

Аннотация. Рассмотрены вопросы организации мониторинга тепловых режимов выплавки и разлива сплавов для литейных предприятий.

Отмечено, что наиболее надежным является способ, когда проведение замеров и фиксирование температуры возлагается на рабочего. С другой стороны, полностью автоматический подход не всегда доступен для небольших литейных предприятий. В связи с этим, показана целесообразность применения автоматизированного подхода, при котором проведение замеров возлагается на рабочего, а фиксирование значений производится автоматически. Такой способ предполагает реализацию алгоритма автоматической классификации температурных замеров на основе сквозного массива данных, полученных в производственном потоке. Решение поставленной задачи разделено на три этапа. На первом этапе производится подготовка исходных данных к процессу классификации. На втором этапе решается задача классификации замеров с использованием принципов искусственных нейронных сетей. Анализ результатов работы искусственной нейронной сети показал ее высокую эффективность и степень соответствия результатов анализа с фактической ситуацией на рабочей площадке. Так же отмечается, что применение принципов искусственных нейронных сетей позволяет сделать процесс классификации гибким, благодаря возможности легко дополнить процесс новыми параметрами и нейронами. Заключительным этапом является анализ полученных результатов. Корректно проведенная классификация данных предоставляет возможность не только проводить оценку соблюдения технологической дисциплины на участке, но и улучшить процесс выявления причин образования брака литья. Применение предложенного подхода позволяет снизить влияние человеческого фактора в процессе анализа тепловых режимов плавки и разлива сплавов при минимальных затратах на обеспечение мониторинга плавки.

Ключевые слова: температура, сплав, отливка, искусственная нейронная сеть, классификация, тепловой режим, плавка, разлива, человеческий фактор.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-856-861

Температура в печи на выпуске и при заливке сплавов оказывает значительное влияние на образование целого ряда дефектов в литых заготовках. Высокая температура сплава способствует образованию усадочных раковин, холодных и горячих трещин, несоответствию механических свойств и других, прямо или косвенно связанных дефектов. Выпуск металла с недостаточной температурой приводит к образованию недоливов, спавев, ухудшению условий удаления газов из сплава, а также к несоответствию макро- и микроструктуры [1 – 4]. Поэтому организация достоверного контроля теплового состояния сплава жизненно необходима в литейном производстве.

На сегодняшний день наиболее технологичным и точным способом температурных измерений является метод погружной термопары [5 – 7]. Измерение температуры жидких сталей и чугунов, как правило, осуществляется в виде разовых актов в определенные технологические периоды. При этом отдельное внима-

ние следует уделить вопросу фиксирования показаний термопары, которое может производиться как вручную, так и автоматически [8 – 10]. Ручной подход предполагает вовлечение рабочего в процесс визуального фиксирования показаний прибора с дальнейшим вводом значений в заводскую базу данных. Применение такого подхода не позволит минимизировать риски, связанные с наличием человеческого фактора и не соответствует современной концепции организации производства. Реализация автоматического способа фиксирования температуры предполагает решение вопроса привязки получаемых значений к участку проведения измерений, что, как правило, решается установкой дополнительных измерительных блоков на каждом участке с их подключением к заводской сети. В данном случае минимизируется неоднозначность процесса фиксирования, но при этом возрастает общая стоимость процесса контроля. Применительно к крупномасштабным металлургическим производствам данный подход без-

условно оправдан, но в литейных цехах с относительно небольшими плавильными агрегатами в несколько тонн и компактными производственными площадками, увеличение парка измерительных блоков может оказаться экономически и технологически нерационально. В этом случае несомненный интерес представляет подход, который позволит минимизировать человеческий фактор на этапе фиксирования значений температуры, но при этом не потребует увеличения парка измерительных приборов.

Целью работы является разработка и реализация способа автоматической классификации температурных замеров на основе сквозного массива данных, полученных в производственном потоке с помощью одного измерительного блока.

В современном металлургическом и литейном производстве все большее применение находят системы интеллектуального анализа данных. Их внедрение позволяет реализовать целый ряд сложных задач по автоматизации, управлению и анализу производственных процессов [11 – 16]. Отдельно следует выделить класс задач по классификации данных, решение которых либо стало возможным только благодаря применению интеллектуальных систем, либо вывело результаты работы на новый качественный уровень. Ярким примером является применение систем распознавания образов для производственных целей, реализация которых успешно базируется на искусственных нейронных сетях (ИНС) [17 – 20].

При решении поставленной задачи также предлагается использовать уже хорошо зарекомендовавшие себя принципы ИНС. Для этого общую постановку задачи необходимо разбить на три этапа.

1. Подготовка исходных данных и формирование пространства признаков.

2. Классификация замеров.

3. Анализ теплового режима плавки.

Целью первого этапа является формирование множества параметров, по которым будет производиться классификация. Исходными данными, влияющими на принятие решения классификации, являются значения температуры и времени проведения замера. В зависимости от эксплуатируемого измерительного оборудования пользователь может получать либо готовый пакет данных – номер замера/время/температура, либо непрерывный поток значений температуры, записанный с заданной дискретностью. Во втором случае данные необходимо предварительно обработать с целью выделения истинной температуры замера. Для этой цели используются различные алгоритмы анализа термограмм, позволяющие выделить площадку термического равновесия [10], значение которой соответствует температуре замера.

Исходных параметров (время и температура) недостаточно для проведения корректной классификации. Для решения этой проблемы необходимо увеличить

размерность пространства признаков при условии соблюдения непротиворечивости параметров. Так, исходный массив замеров дополняется значениями разности между текущей и предыдущей записями (Δt , ΔT), скоростью изменения температуры ($\Delta T/\Delta t$), порядковым номером плавки и кодом, отражающим порядок замера в пределах плавки и признак дублирующего замера.

Для назначения номера плавки используется простой счетчик, срабатывающий по условию превышения значения Δt некоторого порога, отражающего интервал между плавками. Время плавки гарантировано превышает любые другие технологические интервалы, которые являются ее составными частями. В зависимости от технологического процесса время плавки в литейных цехах может быть от одного часа и более. В то же время процесс доводки металла, после его расплавления, стараются свести к минимуму, и время между последующими технологическими операциями редко превышает 10 – 15 мин.

Код замера вводится для его предварительной идентификации. При этом выделяются первый, последний и дублирующие замеры плавки. Согласно технологическому регламенту проведения замеров их должно быть, как минимум, два: замер в печи и замер в ковше. Замер в печи показывает готовность металла и служит сигналом к его выпуску. Замер в ковше подтверждает корректность всех технологических операций по выпуску металла и подготовке ковша и показывает готовность металла к разливке. В дальнейшем, при строгом соблюдении регламента разливки, повторное проведение замеров в ковше не требуется. Таким образом, существует высокая вероятность того, что первый замер плавки – это замер, проведенный в печи, а последний замер – в ковше.

Следует сразу отметить, что классификация при наличии только одного замера в плавке невозможна. Такие плавки проведены с нарушением регламента контроля технологических параметров и должны быть рассмотрены отдельно с выявлением причин нарушения. Кроме того, первый замер плавки всегда будет приниматься за замер, произведенный в печи.

Дублирующий замер производится при возникновении сомнений в корректности показаний. Например, если показания температуры после подогрева металла оказались ниже первоначальных значений, весьма вероятно, что замер выполнен некорректно и требуется повтор. Причины некорректных показаний могут быть связаны как с работой прибора, так и с техникой проведения замеров. Большой объем дублирующих замеров указывает либо на необходимость проверки оборудования, либо на неквалифицированные действия сталевара. Назначение кода дублирующего замера определяется временем, необходимым для выполнения дубля и производится при условии, что Δt меньше минимального технологически обоснованного интервала. При проведении дубля сталевар должен произвести

замену сменного наконечника термопары и повторить замер. Современные приборы позволяют осуществить это за 20 – 30 с [10]. Существенных изменений в ванне печи за такой короткий промежуток времени не происходит, в связи с чем проводить замеры с такой частотой технологически нецелесообразно. Следовательно, если интервал менее 30 с, можно уверенно утверждать, что данный замер является дублирующим. В дальнейшем анализе в расчет принимается значение температуры последнего дубля, при этом предыдущие, «сомнительные» значения игнорируются.

Задача классификации замеров реализована на базе ИНС с архитектурой простой однослойный персептрон [21]. При этом применяются как пороговые, так и линейные функции активации элементов сети. Нормирование значений входных параметров обеспечивает универсальность применения ИНС, однако модель в этом случае получается абстрагированной от исследуемых процессов и трудно поддается описанию с точки зрения взаимодействия входных и выходных параметров. Если опустить этап нормирования, модель работы небольшой ИНС может быть проанализирована с позиции технологии процесса, а применяемые пороговые значения приобретают технологический смысл и могут быть непосредственно назначены из регламентирующей документации.

Рассмотрим работу предложенной ИНС. Значения признаков (табл. 1) поступают на входной слой нейронов, активация которых производится согласно соответствующим пороговым значениям. В результате внутренний слой ИНС получает состояние активации, которое в зависимости от типа нейрона принимает дискретные 0 и 1 или действительное число от 0 до 1. Во внутреннем слое состояния активации умножаются на соответствующие весовые коэффициенты, после чего сигналы поступают на сумматор, который выпол-

няет роль выходного слоя, представляющего результат работы ИНС. Как было отмечено ранее, пороговые значения активации нейронов могут быть назначены в соответствии с регламентом и физикой технологического процесса. Определение же весовых коэффициентов является задачей обучения ИНС.

Рассмотрим логику назначения пороговых значений и работу нейронов сети. Первая пара нейронов отражает порядок замера в процессе плавки. По сути «код замера» в табл. 1 и есть состояние активации первой пары нейронов. Знак значений, поступающих на сумматор после умножения на весовые коэффициенты, указывает на то, в какую сторону будет смещен баланс процесса классификации. Отрицательные значения выходного слоя указывают на то, что замер был выполнен в печи, положительные на замер в ковше. Нулевое или близкое к нулю значение говорит о том, что сеть «не уверена» в своем ответе, и, соответственно, чем больше модуль значения, тем выше «уверенность» в корректности классификации.

Обработка параметра Δt заключена в трех нейронах с использованием порога «время выпуска». Значение данного порога отражает минимальный интервал, за который выполняются все необходимые операции по подготовке к выпуску и, собственно, по выпуску сплава. Это минимально возможное время между замером, выполненным в печи, и последующим замером в ковше. Первый нейрон активируется при выполнении двух условий: значение Δt не превышает порог «время выпуска» и предыдущий замер был выполнен в печи. В этом случае активность нейрона с высокой вероятностью указывает на принадлежность замера к печи. Второй и третий нейроны введены в противовес первому и отражают оставшиеся варианты: интервал больше порогового значения и интервал меньше порогового значения, но при этом предыдущий замер был выполнен в ковше.

Таблица 1

Пример подготовки вектора признаков для классификации замеров

Table 1. An example of preparing a feature vector for measurements classification

Номер замера	Дата – время	T , °C	Δt , ч:мин:с	ΔT , °C	$\Delta T/\Delta t$, °C/мин	Номер плавки	Код замера
1	24.01.19 – 9:39:16	1619,7	–	–	–	1	–1
2	24.01.19 – 9:47:51	1771,9	0:08:35	152,2	17,73	1	0
3	24.01.19 – 9:48:58	1755,9	0:01:07	–16,0	–14,33	1	0
4	24.01.19 – 9:53:26	1715,9	0:04:28	–40,0	–8,96	1	0
5	24.01.19 – 9:57:08	1644,1	0:03:42	–71,8	–19,41	1	1
6	09.01.18 – 15:58:32	1706,5	4:31:35	13,4	0,05	2	–1
7	09.01.18 – 16:04:31	1656,8	0:05:59	–49,7	–9,94	2	1
8	09.01.18 – 18:40:09	1684,2	2:35:38	27,4	0,18	3	–1
9	10.01.18 – 10:05:42	1696,6	15:25:33	12,4	0,01	4	–1
10	10.01.18 – 10:13:50	1654,5	0:08:08	–42,1	–5,26	4	1

Для оценки параметра «изменение температуры ΔT » также задействовано три нейрона. Первый отражает тот факт, что процесс выпуска сплава из печной установки в ковш сопровождается значительными тепловыми потерями и резким уменьшением температуры сплава. Пороговое значение в этом случае будет динамически зависеть от температуры выпускаемого сплава. Чем выше температура сплава, тем выше тепловые потери, и тем больше модуль порога. Для определения его величины предлагается использовать полином второго порядка, где в качестве независимой переменной используется значение температуры сплава из предыдущего замера (температура сплава в печи перед выпуском). Определение коэффициентов уравнения производится на основании фактических данных мониторинга технологического процесса. Линия уравнения должна подчеркивать минимальные значения перепада температуры сплава в процессе его выпуска из печи. Пример уравнения, построенного для условий выпуска стали из ДСП-3, приведен на рис. 1.

Положительный знак величина ΔT принимает в случае нагрева сплава, что технически возможно только в печи. Так, второй нейрон активируется, если ΔT больше, либо равен нулю. Оставшийся интервал от минимального значения перепада температуры до нуля выражается через активацию третьего нейрона.

Таким образом, для решения поставленной задачи задействуется четыре входных параметра и минимум восемь нейронов. Количество последних может быть увеличено при выделении дополнительных особенностей технологического процесса. Так, при реализации данной ИНС, для условий выпуска сплава из печи в два приема был введен нейрон для оценки времени оборота ковша. Пороговое значение – «Минимальное время оборота ковша» применяется для подтверждения того, что замер произведен во втором ковше. При выпуске

сплава в два приема измерения во втором ковше могут быть произведены только после завершения операций разливки и возвращения ковша для выпуска остатков сплава из печи. Учет дополнительных условий позволил увеличить точность процесса классификации и уменьшить объем неопределенных решений.

Результатом работы сети является список принадлежности замеров к участкам их проведения. Очевидно, что ключевыми параметрами, определяющими принадлежность замера, являются изменение температуры и временной интервал. Остальные факторы выполняют вспомогательную роль. Чтобы оценить их вклад и преимущество применения ИНС в процессе классификации, результаты были представлены в двумерном пространстве ΔT , Δt (рис. 2).

Вертикальная сплошная линия на рис. 2 представляет пороговое значение «время выпуска». Вертикальная пунктирная – пороговое значение «минимальное время оборота ковша». Рамкой выделена область неопределенности по перепаду температуры. Данные границы должны делить пространство графика на области принадлежности замеров. Однако хорошо видно, что небольшая часть маркеров проникает в условно выделенные соседние области. Объем таких несоответствий составляет порядка 15 %, что является показателем преимущества применения ИНС, учитывающей вспомогательные параметры процесса.

Анализ теплового режима производится на основе сводной таблицы статистического анализа результатов работы плавильного участка в рассматриваемый период (табл. 2).

Такая форма представления результатов работы ИНС позволяет проводить оценку соблюдения технологической дисциплины на участке и использовать ее при выявлении причин образования брака литья.

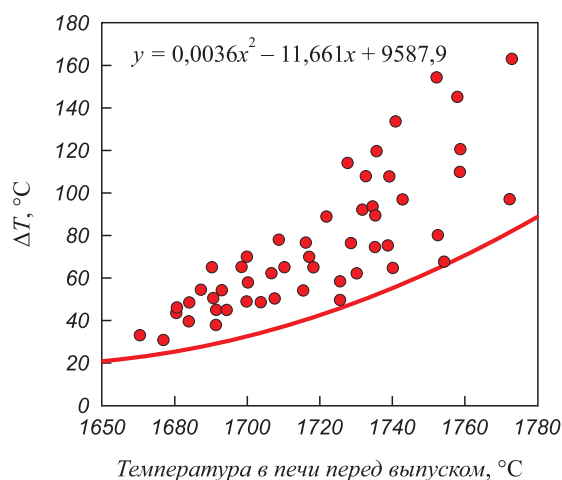


Рис. 1. Определение минимального значения перепада температуры в процессе выпуска стали из ДСП-3

Fig. 1. Determination of minimum value of temperature difference at tapping molten steel from EAF for 3 ton

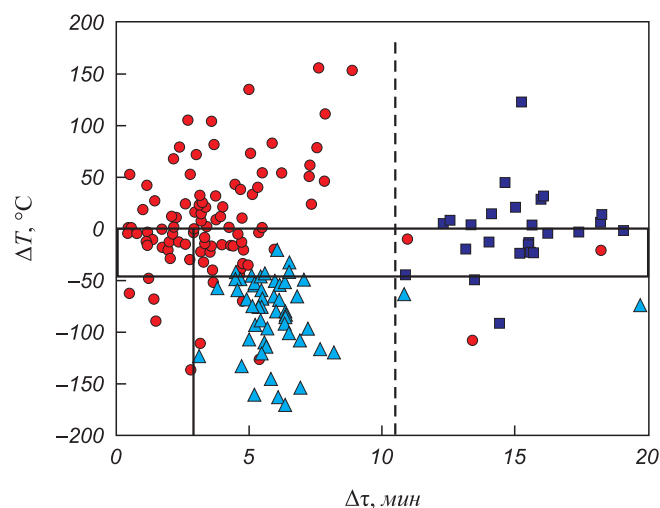


Рис. 2. Распределение результатов классификации:

● – печь; ▲ – ковш; ■ – ковш 2

Fig. 2. Distribution of classification results:

● – furnace; ▲ – ladle; ■ – ladle 2

Т а б л и ц а 2

Сводная таблица пакетной обработки результатов классификации за определенный период работы плавильного участка

Table 2. Summary table of batch processing of classification results for a certain period of the melting site operation

Сплав		Ст35ТЛ	
Плавков согласно плану		65	100 %
Всего плавков согласно замерам		64	98 %
Замеры в печи	Температура $<T_{\min}$	1	2 %
	Температура $>T_{\max}$	37	58 %
	Средняя температура, °С	1702	
Снижение температуры на выпуске, °С		52	
Замеры в первом ковше	Всего замеров	63	97 %
	Температура $<T_{\min}$	15	24 %
	Температура $>T_{\max}$	28	44 %
	Всего несоответствий	43	68 %
	Средняя температура, °С	1649	

Эффективность работы нейронной сети оценивалась по объему неопределенных замеров, который составил не более 10 %. Анализ случаев неопределенности позволил установить, что основная причина их появления связана с отклонениями условий процесса выплавки и выпуска сплава от технологически установленного регламента. Таким образом, результаты работы сети дополнительно могут быть использованы для выявления нарушений хода технологического процесса.

Безусловным преимуществом применения ИНС также является высокий потенциал повышения эффективности процесса классификации при расширении вектора признаков параметрами, прямо или косвенно связанными с процессом плавки, такими как электрические показатели работы плавильного агрегата.

Выводы. Предложенный способ классификации температурных замеров позволяет минимизировать затраты при организации процесса автоматизированного мониторинга тепловых режимов выплавки сплавов в литейных цехах.

Применение ИНС для решения задачи классификации замеров температуры позволяет учитывать влияние косвенных факторов процесса, что обеспечивает высокую степень соответствия (порядка 90 %) результатов анализа с фактической ситуацией на рабочей площадке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дубинин Н.П. Стальное литье: Справочник для мастеров литейного производства. – М.: Машгиз, 1961. – 887 с.

2. Campbell J. Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Techniques and Design. 1st ed. Oxford, UK; Waltham, MA: Butterworth-Heinemann, 2011. – 1220 p.

3. Гиршович Н.Г. Справочник по чугуному литью. – Л.: Машиностроение, 1978. – 758 с.

4. Воронин Ю.Ф., Камаев В.А. Атлас литейных дефектов. Черные сплавы. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 328 с.

5. Вологдин В.В., Харазов В.Г. Об измерении высоких температур в литейном и металлургическом производствах // Литейное производство. 2008. № 10. С. 21 – 27.

6. Гордов А.Н. Основы температурных измерений. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 304 с.

7. Childs P.R.N. Practical Temperature Measurement. Elsevier, 2001. – 386 p.

8. Гордеев Ю., Швецов Г., Репин А. Новые технологии контроля параметров металлических расплавов // НМ-оборудование. 2004. № 2. С. 11 – 14.

9. Кропачев Д.Ю., Гришин А.А., Масло А.Д. Способы оперативного измерения температуры расплава металлов на машиностроительных предприятиях // Металлург. 2012. № 6. С. 82 – 83.

10. Чистяков С., Синявин С., Савин А., Киркин Д. Система измерения температуры и окисленности и отбора проб расплавов стали в электросталеплавильной печи через рабочее окно // Современные технологии автоматизации. 2010. № 4. С. 28 – 34.

11. Chertov A.D. Use of artificial intelligence systems in the metallurgical industry (survey) // Metallurgist. 2003. Vol. 47. No. 7. P. 257 – 264.

12. Sizyakin R. etc. Defect detection on videos using neural network // MATEC Web of Conference. 2017. Vol. 132. Article 05014.

13. Ботников С.А., Хлыбов О.С., Костычев А.Н. Разработка модели прогнозирования температуры металла в сталеразливочном и промежуточном ковшах в литейно-прокатном комплексе // Металлург. 2019. № 8. С. 26 – 35.

14. He F. etc. Hybrid model of molten steel temperature prediction based on ladle heat status and artificial neural network // Journal of Iron and Steel Research Int. 2014. Vol. 21. No. 2. P. 181 – 190.

15. Tian H., Mao Z., Wang A. A new incremental learning modeling method based on multiple models for temperature prediction of molten steel in LF // ISIJ International. 2009. Vol. 49. No. 1. P. 58 – 63.

16. Bednaya T.A., Konovalenko S.P. Development of a neural network model for predicting the physical and chemical properties of materials from the technological parameters of their formation // IOP Conference Series: Material Science and Engineering. 2018. Vol. 447. No. 1. Article 012086.

17. Azimi S.M. etc. Advanced steel microstructural classification by deep learning methods // Scientific Reports. 2018. Vol. 8. No. 1. P. 1 – 14.

18. Masci J. etc. Steel defect classification with Max-Pooling Convolutional Neural Networks // The 2012 Int. Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). 2012. P. 1 – 6.

19. Трофимов В.Б. Многоструктурный распознаватель поверхностных дефектов рельсов // Металлург. 2016. № 4. С. 11 – 16.

20. Sizyakin R., Voronin V., Gapon N. eds. Automatic detection of welding defects using the convolutional neural network // Automated Visual Inspection and Machine Vision III / Beyerer J., Puente León F. eds. Munich, Germany: SPIE, 2019. P. 14.

21. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. – Москва: Вильямс, 2001. – 288 с.

Поступила в редакцию 25 декабря 2019 г.

После доработки 25 декабря 2019 г.

Принята к публикации 20 октября 2020 г.

ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF TEMPERATURE MEASUREMENTS DURING MELTING AND CASTING OF ALLOYS USING NEURAL NETWORKS

A.V. Fedosov^{1,2}, G.V. Chumachenko¹

¹ Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

² LLC “Rostov Foundry”, Rostov-on-Don, Russia

Abstract. The article considers the issues of monitoring the thermal conditions of alloys melting and casting at foundries. It is noted that the least reliable method is when the measurement and fixing the temperature is assigned to the worker. On the other hand, a fully automatic approach is not always available for small foundries. In this regard, the expediency of using an automated approach is shown, in which the measurement is assigned to the worker, and the values are recorded automatically. This method assumes implementation of an algorithm for automatic classification of temperature measurements based on an end-to-end array of data obtained in the production stream. The solving of this task is divided into three stages. Preparing of raw data for classification process is provided on the first stage. On the second stage, the task of measurement classification is solved by using neural network principles. Analysis of the results of the artificial neural network has shown its high efficiency and degree of their correspondence with the actual situation on the work site. It was also noted that the application of artificial neural networks principles makes the classification process flexible, due to the ability to easily supplement the process with new parameters and neurons. The final stage is analysis of the obtained results. Correctly performed data classification provides an opportunity not only to assess compliance with technological discipline at the site, but also to improve the process of identifying the causes of casting defects. Application of the proposed approach allows us to reduce the influence of human factor in the analysis of thermal conditions of alloys melting and casting with minimal costs for melting monitoring.

Keywords: temperature, alloy, casting, artificial neural network, classification, thermal conditions, melting, casting, human factor.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-856-861

REFERENCES

1. Dubinin N.P. *Stal'noe lit'e: spravochnik dlya masterov liteinogo proizvodstva* [Steel Casting: a Guide for Foundry Masters]. Moscow: Mashgiz, 1961, 887 p. (In Russ.).
2. Campbell J. *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Techniques and Design*. 1st ed. Oxford, UK; Waltham, MA: Butterworth-Heinemann, 2011, 1220 p.
3. Girshovich N.G. *Spravochnik po chugunnomu lit'yu* [Iron Casting Guide]. Leningrad: Mashinostroenie, 1978, 758 p. (In Russ.).
4. Voronin Yu.F., Kamaev V.A. *Atlas liteinykh defektov. Chernye splavy* [Atlas of Casting Defects. Ferrous Alloys]. Moscow: Mashinostroenie-1, 2005, 328 p. (In Russ.).
5. Vologdin V.V., Kharazov V.G. Measurement of high temperatures in foundry and metallurgical industries. *Liteinoe proizvodstvo*. 2008, no. 10, pp. 21–27. (In Russ.).
6. Gordov A.N. *Osnovy temperaturnykh izmerenii* [Basics of Temperature Measurement]. Moscow: Energoatomizdat, 1992, 304 p. (In Russ.).
7. Childs P.R.N. *Practical Temperature Measurement*. Elsevier, 2001, 386 p.
8. Gordeev Yu., Shvetsov G., Repin A. New technologies for monitoring the parameters of metal melts. *NM-oborudovanie*. 2004, no. 2, pp. 11–14. (In Russ.).
9. Kropachev D.Yu., Grishin A.A., Maslo A.D. Real-time methods of measuring the temperature of metallic melts at machine plants. *Metallurgist*. 2012, vol. 56, no. 5-6, pp. 472–474.
10. Chistyakov S., Sinyavin S., Savin A., Kirkin D. System for measuring temperature and oxidation and sampling of steel melts in EAF through a working window. *STA*. 2010, no. 4, pp. 28–34. (In Russ.).
11. Chertov A.D. Use of artificial intelligence systems in the metallurgical industry (survey). *Metallurgist*. 2003, vol. 47, no. 7, pp. 257–264.
12. Sizyakin R. etc. Defect detection on videos using neural network. *MATEC Web of Conference*. 2017, vol. 132, article 05014.
13. Botnikov S.A., Khlybov O.S., Kostychev A.N. Development of the metal temperature prediction model for steel-pouring and tundish ladles used at the casting and rolling complex. *Metallurgist*. 2019, vol. 63, no. 7-8, pp. 792–803.
14. He F. etc. Hybrid model of molten steel temperature prediction based on ladle heat status and artificial neural network. *Journal of Iron and Steel Research, Int*. 2014, vol. 21, no. 2, pp. 181–190.
15. Tian H., Mao Z., Wang A. A new incremental learning modeling method based on multiple models for temperature prediction of molten steel in LF. *ISIJ International*. 2009, vol. 49, no. 1, pp. 58–63.
16. Bednaya T.A., Konovalenko S.P. Development of a neural network model for predicting the physical and chemical properties of materials from the technological parameters of their formation. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*. 2018, vol. 447, article 012086.
17. Azimi S.M. etc. Advanced steel microstructural classification by deep learning methods. *Scientific Reports*. 2018, vol. 8, no. 1, pp. 1–14.
18. Masci J. etc. Steel defect classification with Max-Pooling Convolutional Neural Networks. *The 2012 Int. Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. 2012, pp. 1–6.
19. Trofimov V.B. Multi-structural instrument for identifying surface defects on rails. *Metallurgist*. 2016, vol. 60, no. 3-4, pp. 351–357.
20. Sizyakin R., Voronin V., Gapon N., Zelensky A., Pižurica A. Automatic detection of welding defects using the convolutional neural network. In: *Automated Visual Inspection and Machine Vision III*. Beyerer J., Puente León F. eds. Munich, Germany: SPIE, 2019, p. 14.
21. Callan R. *The Essence of Neural Networks*. Prentice Hall, 1998, 248 p. (Russ. ed.: Callan R. *Osnovnye kontseptsii neironnykh setei*. Moscow: Vil'yams, 2001, 288 p.).

Information about the authors:

A.V. Fedosov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Molding and Art Materials Processing” (fedosov-sol@mail.ru)

G.V. Chumachenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair “Molding and Art Materials Processing” (gchumachenko@dstu.edu.ru)

Received December 25, 2019

Revised December 25, 2019

Accepted October 20, 2020

Над номером работали:

Леонтьев Л.И., *главный редактор*

Протопопов Е.В., *заместитель главного редактора*

Ивани Е.А., *заместитель главного редактора*

Бащенко Л.П., *заместитель ответственного секретаря*

Потапова Е.Ю., *заместитель главного редактора по развитию*

Запольская Е.М., *ведущий редактор*

Киселева Н.Н., *ведущий редактор*

Расенец В.В., *верстка, иллюстрации*

Кузнецов А.А., *системный администратор*

Острогорская Г.Ю., *менеджер по работе с клиентами*

Подписано в печать 28.11.2020. Формат 60×90 ¹/₈. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 12,25. Заказ. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСиС.
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4.
Тел./факс: (499) 236-76-17, 236-76-35

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

EDITOR-IN-CHIEF, ACADEMICIAN OF RAS LEOPOLD IGOREVICH LEONTIEV BECAME THE WINNER OF THE DEMIDOV PRIZE IN 2020

TO THE 100TH ANNIVERSARY OF THE CHAIR «ENGINEERING OF TECHNOLOGICAL EQUIPMENT» OF NUST «MISIS»

FROM THE HISTORY OF NITRIDED FERROALLOYS

CONTROL OF OXIDE NON-METALLIC INCLUSIONS IN PRODUCTION OF IF STEEL

DEVELOPMENT OF COMPOSITION AND PROCESS OF OBTAINING MULTICOMPONENT FERROALLOYS

D.K. CHERNOV'S ROLE IN CREATING AND DEVELOPING THE DOCTRINE OF MODERN METALLURGY AND METAL SCIENCE. PART 1. D.K. CHERNOV'S MAIN THEORETICAL AND INDUSTRIAL DISCOVERIES

QUALITY IMPROVEMENT OF CALIBRATED STEEL BY SURFACE DEFORMATION. PART 1. DETERMINATION OF THE STRESSED STATE OF CYLINDRICAL PARTS DURING ORBITAL SURFACE DEFORMATION

MODELING THE STRESS STATE OF STEEL STRIP AT ROLLER LEVELLING MACHINE UNDER CYCLIC ALTERNATING DEFORMATIONS

DEVELOPMENT OF WELDED STRUCTURE OF 5-NOZZLE LANCE HEADS IN CONVERTER SHOP OF PJSC "DNEPROVSKY METALLURGICAL COMBINE"

IMPACT OF TRANSPORTATION ON FOUNDRY COKE QUALITY

CHANGE IN DUCTILITY OF A RAW SAND-CLAY MOLD UNDER INFLUENCE OF GEOMETRIC AND THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF THE CASTING

THE USE OF CARBON-CONTAINING WASTES OF ALUMINUM PRODUCTION IN FERROUS METALLURGY

CHEMICAL REACTIONS DURING IRON REDUCTION FROM OXIDES

ANALYSIS OF PIPE PIERCING ON PRP 70-270 WITH FEM MODELING

ANALYSIS AND CLASSIFICATION OF TEMPERATURE MEASUREMENTS DURING MELTING AND CASTING OF ALLOYS USING NEURAL NETWORKS