

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

№ 12, 2016

Издается с января 1958 г. ежемесячно

Том 59

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)

Ответственный секретарь: ПОЛУЛЯХ Л.А.
(Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

Заместитель ответственного секретаря: ОЛЕНДАРЕНКО Н.П.
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

Члены редакционной коллегии:

АЛЕШИН Н.П. (Российская Академия Наук, г. Москва)
АСТАХОВ М.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
АШИХМИН Г.В. (ОАО «Институт Цветметобработка», г. Москва)
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)
ДУБ А.В. (ЗАО «Наука и инновации», г. Москва)
ЗИНГЕР Р.Ф. (Институт Фридриха-Александра, Германия)
ЗИНИГРАД М. (Институт Ариэля, Израиль)
ЗОЛОТУХИН В.И. (Тульский государственный университет, г. Тула)
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)
КУРНОСОВ В.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ЛАЗУТКИН С.С. (ГК «МетПром», г. Москва)
ЛИНН Х. (ООО «Линн Хай Терм», Германия)

ЛЫСАК В.И. (Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград)
МЫШЛЯЕВ Л.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)
НИКУЛИН С.А. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ПОДГОРОДЕЦКИЙ Г.С., редактор раздела «Ресурсосбережение в черной металлургии» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
ПЫШМИНЦЕВ И.Ю., редактор раздела «Инновации в металлургическом и лабораторном оборудовании, технологиях и материалах» (Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности, г. Челябинск)
РАШЕВ Ц.В., редактор раздела «Стали особого назначения» (Академия наук Болгарии, Болгария)
РУДСКОЙ А.И. (Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург)
СИВАК Б.А. (АО АХК «ВНИИМЕТМАШ», г. Москва)
СИМОНЯН Л.М., редактор раздела «Экология и рациональное природопользование» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)
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)
ШПАЙДЕЛЬ М.О. (Швейцарская академия материаловедения, Швейцария)
ЮРЬЕВ А.Б. (ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк)

Учредители:



Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»



Сибирский государственный индустриальный университет

Настоящий номер журнала подготовлен к печати
Сибирским государственным индустриальным университетом

Адреса редакции:

119049, Москва, Ленинский пр-т, д. 4
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Тел./факс: (495) 638-44-11, (499) 236-14-27
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@isis.ru
www.fermet.misis.ru

654007, Новокузнецк, 7,
Кемеровской обл., ул. Кирова, д. 42
Сибирский государственный индустриальный университет,
Тел.: (3843) 74-86-28
E-mail: redjizvz@sibsiiu.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»

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)

Executive secretary: POLULYAKH L.A.
(National Research Technological University "MISIS", Moscow)

Deputy Executive secretary: OLENDARENKO N.P.
(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

Editorial Board:

N.P. ALESHIN (Russian Academy of Sciences, Moscow)

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

G.V. ASHIKHMIN (JSC "Institute Tsvetmetobrabotka", Moscow)

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)

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

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

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

M. ZINIGRAD (Ariel University, Israel)

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

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)

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

S.S. LAZUTKIN (Group of Companies "MetProm", Moscow)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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)

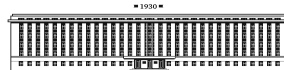
M.R. FILONOV, Editor of the section "**Material science**" (National Research Technological University "MISIS", Moscow)

A.B. YUR'EV (OJSC "ZSMK", Novokuznetsk)

Founders:



National Research Technological University "MISIS"



Siberian State Industrial University

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

Editorial Addresses:

119049, Moscow, Leninskii prosp., 4
National Research Technological University "MISIS",
Tel./fax: +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.

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

РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

- Тимофеева А.С., Никитченко Т.В., Федина В.В., Елисеєва К.А.
Влияние ударных нагрузок на прочность железорудных окатышей 847
- Якубайлик Э.К., Ганженко И.М., Бутов П.Ю. Удельная магнитная восприимчивость железных руд сибирских месторождений 852

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Павловец В.М. Формирование структуры железорудных окатышей, полученных с использованием теплосилового напыления влажной шихты 857
- Титова К.О., Котельников Г.И., Зубарев К.А., Григорович К.В. Анализ процесса восстановления железа из футеровки при выплавке никель-медных сплавов в вакуумных индукционных печах 864
- Шинкин В.Н. Расчет сил и моментов семироликовой правильной машины при предварительной правке стального листа 870

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

- Никитин А.Г., Абрамов А.В., Гредина А.А., Гаряшин В.В. Анализ работы шарнира кривошип – коренная опора кривошипно-коромыслового механизма щековой дробилки 875
- Подгородецкий Г.С., Третьяк А.А., Горбунов В.Б., Полулях Л.А. Перспективы использования политопливного газогенератора в практике работы доменных цехов 879
- Огарков Н.Н., Звягина Е.Ю., Залетов Ю.Д., Хоменко Н.Н., Керимова Л.Ф. Повышение плотности пиков микрогеометрии автомобильного листа за счет совершенствования контрукции дробебетонной установки 886

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Баранникова С.А., Косинов Д.А., Зуев Л.Б., Громов В.Е., Коновалов С.В. Влияние водорода на макролокализацию пластической деформации низкоуглеродистой стали 891

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Руденко А.Л. Кинетика межфазного перехода серы в процессе ковшевого рафинирования чугуна магнием 896

СТАЛИ ОСОБОГО НАЗНАЧЕНИЯ

- Любимова Л.Л., Makeev A.A., Zavorin A.S., Tashlykov A.A. Оценка напряженного состояния при упруго-пластических деформациях аустенитной хромомарганцевой жаропрочной стали 903

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

- Медведев А.В., Корнет М.Е., Чжан Е.А. О непараметрических алгоритмах моделирования кислородно-конвертерной плавки 910
- К 85-летию Владимира Николаевича Перетятко 916
- Указатель статей, помещенных в 2016 г. 917

CONTENTS

RESOURCE SAVING IN FERROUS METALLURGY

- A.S. Timofeeva, T.V. Nikitchenko, V.V. Fedina, K.A. Eliseeva Effect of shock loads on the strength of iron ore pellets 847
- E.K. Yakubailik, I.M. Ganzhenko, P.Yu. Butov Specific magnetic susceptibility of iron ores of Siberian deposits 852

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- V.M. Pavlovets Formation of the structure of iron ore pellets produced using heat-spraying of wet charge 857
- K.O. Titova, G.I. Kotelnikov, K.A. Zubarev, K.V. Grigorovich Analysis of iron reduction from the lining at vacuum smelting of the Ni–Cu alloys 864
- V.N. Shinkin Calculation of steel sheet's curvature under preliminary flattening on the seven-roller straightening machine 870

INNOVATIONS IN METALLURGICAL INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES AND MATERIALS

- A.G. Nikitin, A.V. Abramov, A.A. Gredina, V.V. Garyashin Analysis of crank hinge – radical bearing of crank-beam mechanism of jaw crusher 875
- G.S. Podgorodetskii, A.A. Tretyak, V.B. Gorbunov, L.A. Polulyakh Perspective use of poly-fuel gas generator in practice of blast-furnace shops 879
- N.N. Ogarkov, E.Yu. Zvyagina, Yu.D. Zaletov, N.N. Khomenko, L.F. Kerimova Increasing the density of peaks microgeometry of automobile sheet due to improvement of the shot-blasting unit design 886

MATERIAL SCIENCE

- S.A. Barannikova, D.A. Kosinov, L.B. Zuev, V.E. Gromov, S.V. Kononov Hydrogen effect on macrolocalization of plastic deformation of low carbon steel 891

PHYSICO-CHEMICAL BASICS OF METALLURGICAL PROCESSES

- A.L. Rudenko Kinetics of interfacial transition of sulfur during ladle refining of iron by magnesium 896

SUPERDUTY STEEL

- L.L. Lyubimova, A.A. Makeev, A.S. Zavorin, A.A. Tashlykov Estimation of the stress state at elastic-plastic deformation of austenitic chromium-manganese heat-resistant steel 903

INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

- A.V. Medvedev, M.E. Kornet, E.A. Chzhan On nonparametric modeling algorithms of BOF process 910
- To the 85th Anniversary of V.N. Peretyat'ko 916
- Index of articles "Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy" for 2016. Vol. 59 917

УДК 669.168.054

ВЛИЯНИЕ УДАРНЫХ НАГРУЗОК НА ПРОЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ*

Тимофеева А.С., к.т.н., доцент кафедры металлургии и металловедения (dakatuli@bk.ru)

Никитченко Т.В., к.т.н., доцент кафедры металлургии
и металловедения (nikitchenko_t_v@lebgok.ru)

Федина В.В., к.т.н., доцент кафедры металлургии и металловедения (fedinavv@mail.ru)

Елисеева К.А., магистрант кафедры металлургии и металловедения (blond_7067@mail.ru)

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

Аннотация. При производстве окатышей к ним предъявляются определенные требования, в том числе и по прочности. Окатыши подвергаются дополнительным ударным нагрузкам в перегрузочных узлах, в портах, в результате чего происходит не только их частичное разрушение, но и снижение прочностных свойств в целом. В работе представлены исследования по разупрочнению окатышей по классам в зависимости от ударных нагрузок. При производстве окатышей следует учитывать вероятность их разупрочнения в результате погрузо-разгрузочных операций в процессе транспортировки. При этом, чем больше число перегрузок и их высота, тем выше должен быть запас прочности. Например, при наличии от 5 до 10 перегрузок прочность производимых окатышей должна составлять не менее 285 кг/окатыш, чтобы при поступлении к потребителю их прочность была не менее 200 кг/окатыш. При воздействии ударных нагрузок прочность окатышей на сжатие снижается в результате образования внутренних трещин. Начальная прочность окатышей должна быть выше значения, гарантированного техническими или договорными условиями.

Ключевые слова: окатыши, класс, прочность, разупрочнение, удар, нагрузки, трещины, запас прочности, транспортировка.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-847-851

Одним из основных способов достижения устойчиво высоких результатов в металлургическом производстве является правильно подготовленное сырье. Окатыши железорудные служат сырьем для доменных печей и установок прямого восстановления железа из оксидов. Согласно последним данным в производстве губчатого железа переработано 56,2 млн. т железорудного сырья, из них 79 % приходится на окатыши, 19 % – на кусковую руду и 2 % – на рудную мелочь [1]. Металлургами железорудные окатыши рассматриваются с позиций перспективности сырья, которое будет транспортироваться на любые расстояния без потерь ими металлургических свойств, поэтому прочностным свойствам железорудных обожженных окатышей уделяется большое внимание. Ввиду того, что окатыши подвергаются дополнительным ударным нагрузкам в перегрузочных узлах, в портах, происходит не только их частичное разрушение, но и снижение прочностных свойств в целом [2].

Прочность на сжатие – это максимальная нагрузка, которую способен выдержать окатыш до разрушения; разупрочнение – процесс накопления повреждений в окатыше под действием переменных, либо циклических нагрузок, которые впоследствии приводят к изменению прочностных свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению [3].

В лаборатории Старооскольского филиала СТИ НИТУ «МИСиС» начаты работы по исследованию изменений прочности железорудных обожженных окатышей в результате воздействия на них ударных нагрузок [4]. Целью настоящей работы является определение необходимого запаса прочности, чтобы после транспортировки окатышей от производителя до потребителя их показатель прочности сохранялся в рамках технических или договорных условий [5].

С механической точки зрения явление удара характеризуется тем, что скорости точек механической системы, а следовательно, и количество движения этой системы изменяются за весьма малый промежуток времени, измеряемый в тысячных и меньших долях секунды, в течение которого происходит удар, т.е. изменяются на конечную величину. Так, например, при падении тела на неподвижную плиту, как показывает опыт, за весьма малый промежуток времени, в течение которого тело соприкасается с плитой, его скорость изменяется на конечную величину. Это явление удара [6 – 8].

Сотрудники НИТУ «МИСиС» А.В. Смагина, В.В. Коровушкин и другие исследовали механизм разрушения железорудных зональных окатышей, состоящих из магнетитового ядра и гематитовой оболочки [9 – 11]. С помощью экспериментов и расчетов пришли к выводу, что при сжатии разрушение окатышей начинается в центре под действием растягивающих напряжений от

* Исследование выполнено в рамках государственного задания №11.63.2014/к.

сжимающей нагрузки, направленной вдоль оси приложения силы.

Проведенное сравнение микротвердости ядра и оболочки в зональном окатыше показало, что микротвердость оболочки в 1,5 раза выше микротвердости ядра, при этом экспериментально установлено, что магнетит более подвержен трещинообразованию, чем гематит. Образование трещин в магнетитовом ядре наступает при меньшей нагрузке.

В дальнейшем пришли к выводу, что разрушение окатышей начинается с появлением трещины в оболочке в точках приложения нагрузки на поверхности, где большие значения напряжений и деформаций окатыша, в соответствии с их эпюрами. Это происходит несмотря на первичное образование микротрещин в ядре окатыша магнетитового состава вследствие распирающих горизонтальных сил в ядре, большую его пористость и меньшую твердость. При этом на разрушающие напряжения будет влиять и диаметр ядра, поскольку с его увеличением прочность окатыша уменьшается. Сначала образуются микротрещины в ядре окатыша с одновременным увеличением пористости ядра, что ослабляет прочность магнетитового ядра в целом, а затем, при достижении предела прочности оболочки, в ней появляются трещины, и она раскалывается. Результаты исследования позволяют понять механизм разрушения окатышей.

В настоящей работе проводились эксперименты по выявлению степени разупрочнения окатышей в результате ударных нагрузок, имитирующих различные перегрузки при их транспортировке от поставщика потребителю [5].

Для этого отбирались окатыши с конвейера обжиговой машины из одной партии и классифицировались по следующим размерам: 8 – 10 мм; 10 – 12 мм; 12 – 14 мм; 14 – 16 мм и более 16 мм. Затем определялось значение прочности на сжатие окатышей каждой фракции до воздействия ударных нагрузок (рис. 1). Начальная

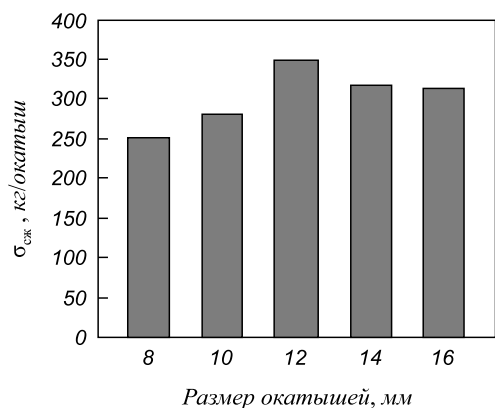


Рис. 1. Прочность окатышей на сжатие до воздействия ударных нагрузок

Fig. 1. Pellet durability on compression up to the influence of impact loads

прочность исследуемой фракции определялась по 15 окатышам и усреднялась. Измерения прочности на сжатие выполняли с помощью пресса [12].

Также проводились серии сбросов – по 28 сбрасываний для каждой фракции. Окатыши сбрасывались с высоты 1 м [13] в лабораторной установке (рис. 2). После очередного сбрасывания изымались пять окатышей и измерялась их прочность на прессе. Каждая серия сбросов была выполнена по 7 – 8 раз. После того, как все эксперименты были проведены, показания прочности окатышей усреднялись по всем сериям сбрасываний для каждого числа сбросов.

В качестве показателя разупрочнения применили относительное снижение прочности окатыша по отношению к начальной прочности:

$$R = \frac{P_i - P_0}{P_0} \cdot 100, \%,$$

здесь P_i – средняя прочность для i -го сбрасывания по всем сериям определенной фракции окатышей, кг/окатыш; P_0 – начальная прочность окатышей данной фракции, усредненная для всей серии испытаний, кг/окатыш.

Результаты испытаний представлены на рис. 3.

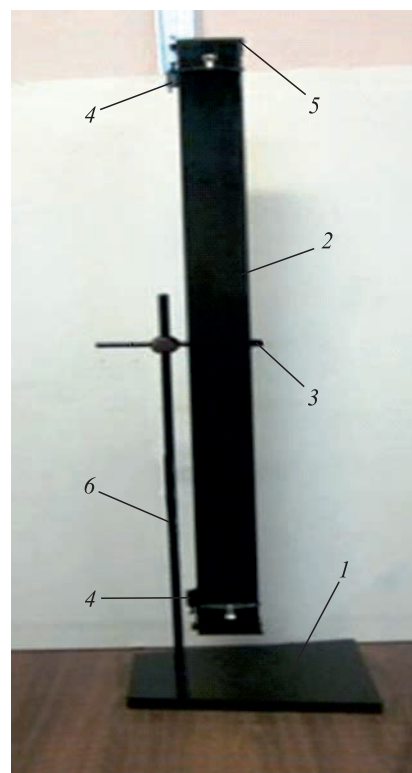


Рис. 2. Лабораторная установка для определения прочности на удар: 1 – подставка; 2 – емкость, в которой падают окатыши; 3 – ось вращения емкости; 4 – заслонки; 5 – крышка емкости с замком; 6 – стойка

Fig. 2. Laboratory unit for the determination of impact strength: 1 – lug; 2 – holding tank, in which the pellets are given; 3 – hinge axis of the holding tank; 4 – leaf; 5 – head of holding tank with the lock; 6 – pillar stand

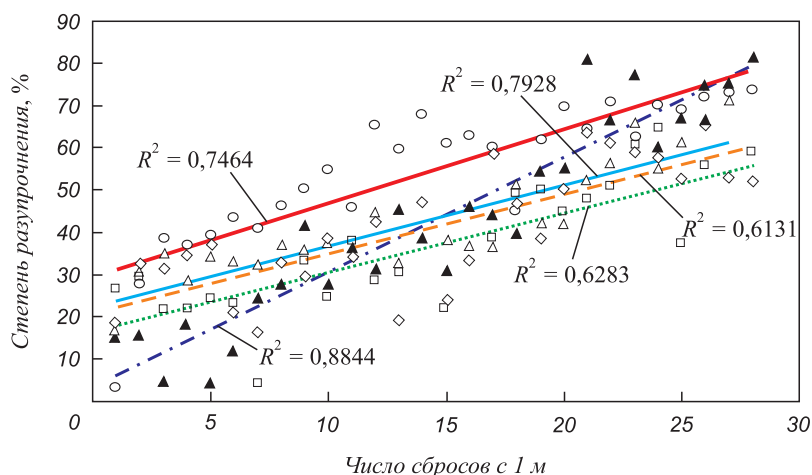


Рис. 3. Разупрочнение окатышей в зависимости от числа сбросов:

□, --- 10 мм; ○, — 8 мм; ▲, - - - 12 мм; △, — 16 мм; ◆, - - - 14 мм

Fig. 3. Softening of pellets depending on the number of outlets:

□, --- 10 mm; ○, — 8 mm; ▲, - - - 12 mm; △, — 16 mm; ◆, - - - 14 mm

Когда напряжение прикладывают к телу, оно деформируется сначала упруго, затем пластически, причем около структурных неоднородностей, имевшихся в исходном состоянии или возникающих при пластической деформации, возникают большие локальные напряжения (например, в кристаллах в результате скопления дислокаций). В этих местах зарождаются микротрещины [8, 14, 15]. Их концентрация может быть очень высокой. Однако их размеры, определяемые масштабом структурных неоднородностей, значительно меньше критического расстояния, при котором образуются трещины. Под постоянным напряжением размеры и концентрация трещин растут медленно, и тело не разрушается пока случайно, например благодаря последовательному слиянию близко расположенных трещин, одна из них не дорастет до критического размера.

Анализ представленных на рис. 3 зависимостей показывает, что наибольшая склонность к разупрочнению от воздействия ударных нагрузок характерна для самых мелких окатышей (8 мм). Для окатышей 16 и 14 мм степень разупрочнения почти одинаковая. До 10 ударов наименьшая степень разупрочнения характерна для окатышей размером 12,5 мм, но затем степень разупрочнения возрастает. Для окатышей размером 10 мм степень разупрочнения меняется так же, как и для окатышей 14 и 16 мм, но ее значения ниже на 5–6 %.

Выполненный химический анализ обожженных окатышей различного размера показал, что чем меньше диаметр окатыша, тем выше полнота окисления, т.е. меньше магнетитовое ядро (рис. 4).

Окатыши размером 8 мм характеризуются меньшей прочностью на сжатие в силу своего размера, кроме того, эти окатыши более пористые, поэтому их разупрочнение наиболее высокое. Наиболее высокая прочность характерна для 12-мм окатышей. По мере увеличения размера окатыша повышается размер вну-

треннего магнетитового ядра, поэтому возрастает показатель разупрочнения.

Случайное распределение структурных неоднородностей по объему образца по размерам и по степени прочности и случайный характер термических флуктуаций приводят к высокому разбросу значений прочности при испытаниях одинаковых образцов. Изменение скорости разупрочнения окатышей размером от 12 до 14 мм вероятнее всего обусловлено наличием внутренних трещин.

Анализ прочностных свойств обожженных окатышей после воздействия ударных нагрузок показал, что при сбрасываниях с высоты 1 м до 10 раз прочность практически всех окатышей снижается примерно на 30 % (рис. 5). При сбрасываниях от 15 до 20 раз этот показатель снижается почти в два раза.

Таким образом, при производстве окатышей следует учитывать вероятность их разупрочнения в результате погрузо-разгрузочных операций в процессе транспор-

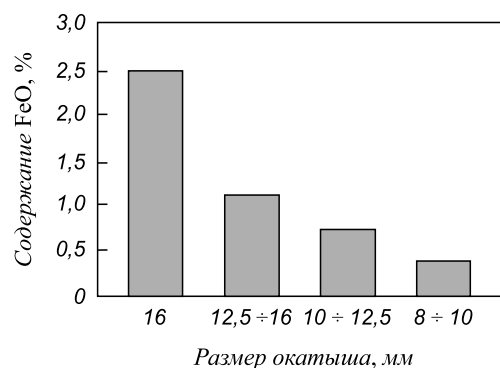


Рис. 4. Зависимость содержания остаточного магнетита в обожженных окатышах от их размера

Fig. 4. Dependence of the content of residual magnetite in burnt pellets on their size

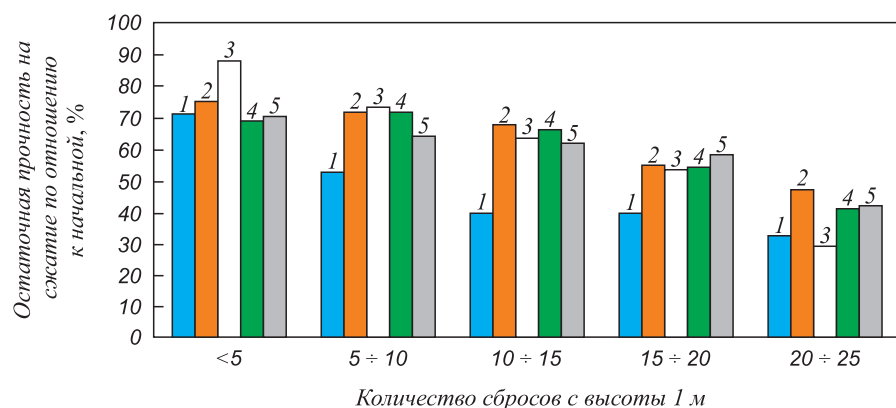


Рис. 5. Изменение остаточной прочности окатышей в зависимости от воздействия ударных нагрузок:
1 – 8 мм; 2 – 10 мм; 3 – 12 мм; 4 – 14 мм; 5 – 16 мм

Fig. 5. Change of residual strength of pellets in dependence on the influence of shock loads:
1 – 8 mm; 2 – 10 mm; 3 – 12 mm; 4 – 14 mm; 5 – 16 mm

тировки. Чем больше число перегрузок и их высота, тем выше должен быть запас прочности, например, при наличии от 5 до 10 перегрузок прочность производимых окатышей должна составлять не менее 285 кг/окатыш, чтобы при поступлении к потребителю их прочность была не менее 200 кг/окатыш.

Выводы. При воздействии ударных нагрузок прочность окатышей на сжатие снижается в результате образования внутренних трещин, поэтому начальная их прочность (при производстве) должна быть выше гарантированного значения по техническим или договорным условиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карабасов Ю.С. Сталь на рубеже столетий. – М.: МИСиС, 2001. – 664 с.
2. Тимофеева А.С., Никитченко Т.В., Чичварин А.В., Федина В.В., Тимофеева Е.М. Целесообразность покрытия неофлюсованных окатышей с целью уменьшения истирания при транспортировке // Сб. научных и научно-практических докладов всероссийской научно-практической конференции студентов и аспирантов. Т. 1. – Старый Оскол: изд. СТИ НИТУ МИСиС, 2013. С. 296 – 300.
3. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. – М.: изд. МИСиС, 2005. – 432 с.
4. Тимофеева А.С., Федина В.В., Крахт Л.Н., Никитченко Т.В. Влияние количества сбрасываний на прочностные свойства окатышей // Изв. вуз. Черная металлургия. 2008. № 8. С. 64 – 66.
5. Тимофеева А.С., Федина В.В., Крахт Л.Н., Семин П.В., Корсун Н.А. Влияние количества перегрузок обожженных неофлюсованных окатышей на их прочность и истирание // Современные наукоемкие технологии. 2007. № 12. С. 113, 114.
6. Манжосов В.К., Новикова О.Д., Новиков А.А. Теоретическая механика. Ч. II. Динамика. Аналитическая механика: Учебное пособие. – Ульяновск: изд. УлГТУ. 2011. – 194 с.
7. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов: Учебник для вузов; Под ред. А.В. Александрова. 3-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2003. – 560 с.
8. Трофимова Т.И. Курс физики: Учебное пособие для вузов. – М.: Академия, 2006. – 560 с.
9. Смагина А.В., Коровушкин В.В., Подгородецкий Г.С., Бижапов А.М., Нуштаев Д.В. Исследование механизма разрушения окатышей под действием внешних нагрузок // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 7. С. 9 – 14.
10. Смагина А.В., Коровушкин В.В., Шипко М.Н., Староверов Б.А., Подгородецкий Г.С. Повышение прочности окисленных окатышей с помощью магнитоимпульсной обработки // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. № 10. С. 31 – 35.
11. Пат. 2476607 РФ. Способ обработки железорудных окатышей / В.В. Коровушкин, М.Н. Шипко, Г.С. Подгородецкий, Б.А. Староверов, Н.М. Дуров, А.В. Смагина. заявл. 14.09.11; опубл. 27.02.13. Бюл. №6.
12. ГОСТ 24765 – 81 Окатыши железорудные. Метод определения прочности на сжатие. – Изм. 2009-23-06. – М.: ИПК Изд-во стандартов. 2009. – 7 с.
13. ГОСТ 25471 – 82. Руды железные, агломераты и окатыши. Метод определения прочности на сбрасывание. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004. – 5 с.
14. Абзалов В.М., Горбачев В.А., Клейн В.И., Мальцева В.Е., Шаврин С.В. Соотношение процессов упрочнения и разупрочнения при обжиге железорудных окатышей // Изв. вузов Черная металлургия. 2001. № 1. С. 64, 65.
15. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды. – М.: Наука, 1979. – 384 с.

Поступила 25 августа 2016 г.

EFFECT OF SHOCK LOADS ON THE STRENGTH OF IRON ORE PELLETS

A.S. Timofeeva, T.V. Nikitchenko, V.V. Fedina, K.A. Eliseeva

Stary Oskol Technological Institute of National University of Science and Technology "MISiS", Stary Oskol, Belgorod Region, Russia

Abstract. At production of pellets one makes special demands on them, including the strength requirements. Pellets are subjected to the additional impact stresses in transfer units and ports; as a result there is not only their partial destruction but the decrease of strength properties in tota-

lity. The paper presents the research results on the destruction of pellets according to the classes, depending on the impact stress. When producing the pellets, it should be taken into consideration the probability of their softening in the results of loading and unloading operations during the transportation. Thereby, the safety factor increases with the increase of the number of loads and their height. For example, in the case from 5 to 10 loads the strength of the produced pellets should be not less than 285 kg/pellet; and when they are received by the consumers their strength should be not less than 200 kg/pellet. At the impact of stresses the compression strength of pellets decreases as the result of inner fractions formation. The primary strength of pellets should be more than the value, guaranteed by technical or contractual conditions.

Keywords: pellets, class, strength, softening, stroke, loads, cracks, safety factor, transportation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-847-851

REFERENCES

1. Karabasov Yu.S. *Stal' na rubezhe stoletii* [Steel at the turn of the century]. Moscow: MISiS, 2001, 664 p. (In Russ.).
2. Timofeeva A.S., Nikitchenko T.V., Chichvarin A.V., Fedina V.V., Timofeeva E.M. Feasibility of the coating of non-fluxed pellets in order to decrease the wear when transporting. In: *Sb. nauchnykh i nauchno-prakticheskikh dokladov vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov i aspirantov. T. 1.* [Coll. of scientific and practical reports of the All-Russian Scientific-Practical Conference of Students and Graduate Students. Vol. 1]. Stary Oskol: STI NITU MISiS, 2013, pp. 296–300. (In Russ.).
3. Gorelik S.S., Dobatkin S.V., Kaputkina L.M. *Rekristallizatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys]. Moscow: MISiS, 2005, 432 p. (In Russ.).
4. Timofeeva A.S., Fedina V.V., Krakht L.N., Nikitchenko T.V. Influence of the number of droppings on the strength properties of pellets. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2008, no. 8, pp. 64–66. (In Russ.).
5. Timofeeva A.S., Fedina V.V., Krakht L.N., Semin P.V., Korsun N.A. Influence of the number of overloads of burnt non-fluxed pellets on their strength and wear. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii.* 2007, no. 12, pp. 113, 114. (In Russ.).
6. Manzhosov V.K., Novikova O.D., Novikov A.A. *Teoreticheskaya mekhanika. Ch. II. Dinamika. Analiticheskaya mekhanika: uchebnoe posobie* [Theoretical mechanics. Part II. Dynamics. Analytical mechanics: Tutorial]. Ulyanovsk: UIGTU. 2011, 194 p. (In Russ.).
7. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. *Soprotivlenie materialov: uchebnyk dlya vuzov* [Strength of materials: Textbook for universities]. Aleksandrov A.V. ed. Moscow: Vysshaya shkola, 2003, 560 p. (In Russ.).
8. Trofimova T.I. *Kurs fiziki: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Course of physics: Tutorial for universities]. Moscow: Akademiya, 2006, 560 p. (In Russ.).
9. Smagina A.V., Korovushkin V.V., Podgorodetskii G.S., Bizhanov A.M., Nushtaev D.V. Investigation of destruction process of the double phased iron ore pellets under external loads. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2013, no. 7, pp. 9–14. (In Russ.).
10. Smagina A.V., Korovushkin V.V., Shipko M.N., Staroverov B.A., Podgorodetskii G.S. Strength increase of oxidized pellets with the aid of magnetic-pulse treatment. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov.* 2014, no. 10, pp. 31–35. (In Russ.).
11. Korovushkin V.V., Shipko M.N., Podgorodetskii G.S., Staroverov B.A., Durov N.M., Smagina A.V. *Sposob obrabotki zhelezorudnykh okatyshei* [The treatment of iron-ore pellets]. Patent RF no. 2476607, *Byulleten' izobretenii.* 2013, no. 6. (In Russ.).
12. GOST 24765–81. *Okatyschi zhelezorudnye. Metod opredeleniya prochnosti na szhatie* [Iron-ore pellets. Definition of compression strength]. Moscow: IPK Izd-vo standartov. 2009, 7 p. (In Russ.).
13. GOST 25471–82. *Rudy zheleznye, aglomeraty i okatyschi. Metod opredeleniya prochnosti na sbrasyvanie* [Iron ores, agglomerates and pellets. Definition of drop strength]. Moscow: IPK Izd-vo standartov, 2004, 5 p. (In Russ.).
14. Abzalov V.M., Gorbachev V.A., Klein V.I., Mal'tseva V.E., Shavrin S.V. Correlation of the hardening and softening processes at burning of iron-ore pellets. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2001, no. 1, pp. 64, 65. (In Russ.).
15. Rebinder P.A. *Poverkhnostnye yavleniya v dispersnykh sistemakh. Fiziko-khimicheskaya mekhanika. Izbrannye trudy* [Surface conditions in dispersed systems. Physical-chemical mechanics. Selected papers]. Moscow: Nauka, 1979, 384 p. (In Russ.).

Acknowledgements. The study was performed within the framework of the state task no.11.63.2014/a.

Information about the authors:

A.S. Timofeeva, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metallurgy and Metallography” (dakatuli@bk.ru)

T.V. Nikitchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallurgy and Metallography” (nikitchenko_t_v@lebgok.ru)

V.V. Fedina, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallurgy and Metallography” (fedinavv@mail.ru)

K.A. Eliseeva, MA Student of the Chair “Metallurgy and Metallography” (blond_7067@mail.ru)

Received August 25, 2016

УДЕЛЬНАЯ МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД СИБИРСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Якубайлик Э.К.¹, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник (churilov@iph.krasn.ru)

Ганженко И.М.², инженер (a.ganzhenko@mail.ru)

Бутов П.Ю.², главный обогатитель (Pavel.Butov@evraz.com)

¹Институт физики СО РАН им. Л.В. Киренского
(660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 38)

²ОАО «Евразруда»
(654018, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, проспект Курако, 49а)

Аннотация. Содержатся результаты исследования удельной магнитной восприимчивости первичных концентратов сибирских железорудных месторождений, ее зависимости от магнитного поля сепаратора. Опыты (лабораторная сепарация, магнитные измерения) выполнены на концентрате класса крупности –0,07 мм. Изучались руды семи месторождений, четыре из которых магнетитовые, а три – слабоокисленные, что обусловлено содержанием в них от 3 до 6 % мартита, гематита и лимонита. Наибольшими значениями магнитной восприимчивости обладают промпродукты магнетитовых руд, меньшими – слабоокисленные, однако поля максимумов удельной магнитной восприимчивости проб у последних выше. Эксперименты показали, что значения удельной магнитной восприимчивости первичных концентратов пропорциональны содержанию в них магнетитового железа.

Ключевые слова: удельная магнитная восприимчивость, первичные концентраты, магнетитовые, слабоокисленные руды, магнетитовое железо.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-852-856

Удельная магнитная восприимчивость (χ) является одним из основных параметров ферромагнетиков, входящим в известное выражение удельной магнитной силы магнитного притяжения частиц к полюсам сепаратора:

$$f_{\text{mag}} = \chi H \text{grad} H;$$

здесь H – напряженность магнитного поля сепаратора.

Таким образом, удельная магнитная восприимчивость, наряду с удельной магнитной силой магнитной системы (ее конструкцией), фактически определяет поведение ферромагнитных частиц в магнитном поле сепаратора. Следовательно, для разработки технологических режимов магнитного обогащения практически необходимо знание величин удельной магнитной восприимчивости первичных концентратов железосодержащих руд, их зависимости [1, 2] от магнитного поля сепаратора.

Объектами изучения являлись промпродукты сухой магнитной сепарации семи обогатительных фабрик сибирских месторождений. Исследования проведены совместно специалистами Абагурского филиала ОАО «Евразруда» и сотрудниками Института физики СО РАН. Подготовка проб к исследованиям (измельчение, классификация), измерение магнитных характеристик выполнены в Институте физики, лабораторная мокрая магнитная сепарация – на Абагурской обогатительной фабрике и в Институте физики СО РАН, химический

анализ исходных и изученных проб – в Центральной технологической лаборатории ОАО «Евразруда».

В качестве образцов для исследований на Абагурской обогатительной фабрике были отобраны девять проб первичных концентратов. По вещественному составу исходные промпродукты укрупненно можно разделить на две группы: магнетитовые (с месторождений Ирба, Каз, Шерегеш, Таштагол и Абакан) и слабоокисленные руды (с месторождений Тёя, Изых-Гол, Краснокаменск).

Результаты химического анализа первичных концентратов и продуктов их мокрой сепарации представлены следующими данными (в числителе – для исходных проб, в знаменателе – для магнитных фракций):

Проба руды месторождения	Содержание, %	
	Fe _{общ}	Fe _{mag}
Слабоокисленные руды		
Тёя	<u>36,00</u>	<u>32,10</u>
	61,25	60,37
Краснокаменск	<u>38,90</u>	<u>31,90</u>
	65,94	65,11
Иzych-Гол	<u>41,20</u>	<u>30,90</u>
	67,33	66,24
Магнетитовые руды		
Ирба	<u>44,90</u>	<u>40,80</u>
	66,39	65,54

Абакан	50,90	46,00
	66,80	65,75
Таштагол	41,40	37,30
	66,06	65,33
Шерегеш	41,20	38,20
	63,04	62,14
Каз	47,10	42,40
	64,67	63,26

Примечание. Слабоокисленные руды содержат от 3 до 6 % мартита, гематита и лимонита.

Видно, что содержание $Fe_{\text{общ}}$ и $Fe_{\text{маг}}$ в первичных концентратах магнетитовых руд примерно на 15 % выше, чем в слабоокисленных. К примеру, в промпродукте с месторождения Абакана содержание $Fe_{\text{общ}}$ и $Fe_{\text{маг}}$ составляет примерно 51 и 46 %; в слабоокисленной пробе Тёи – соответственно 36 и 32 %.

Названные продукты исследовались и ранее. Результаты лабораторного мокрого магнитного анализа перечисленных первичных концентратов в поле напряженностью $H = 80$ кА/м, близком к «рабочему» полю сепарации, опубликованы в работе [3]. Основные магнитные характеристики промпродуктов – удельная намагниченность насыщения σ_s , удельная остаточная намагниченность σ_r , коэрцитивная сила H_c обсуждались в исследовании [4], однако удельная магнитная восприимчивость этих продуктов изучена слабо. Остановимся более подробно на изучении этой характеристики.

Удельная магнитная восприимчивость промпродуктов сухого магнитного обогащения сибирских руд исследуется с 80-х годов прошлого века [5]. На материале пяти месторождений подтверждены известные в ферромагнетизме закономерности: зависимость этой величины от содержания магнетитового железа в пробе, от крупности частиц (значительный ее спад при уменьшении размера частиц). Последнее явление, как показывает практика обогащения, приводит к большим потерям магнетитового железа с отвальными хвостами как при сухой, так и при мокрой магнитной сепарации [6, 7].

Заметим, что за десятилетия эксплуатации месторождений состав руд, включая генетические особенности, наличие немагнитных включений и изоморфных замещений, степень окисленности, существенно изменились. Таким образом необходима новая оценка величин их магнитных параметров для оптимизации процессов магнитной сепарации.

По величинам удельной намагниченности σ первичных концентратов в различных магнитных полях, измеренной на автоматизированном вибрационном магнитометре [8], и значениям этих полей подсчитана удельная магнитная восприимчивость χ проб.

Зависимость удельной магнитной восприимчивости от содержания магнетитового железа в пробах руд различных месторождений представлена на рис. 1 (при $H = 80$ кА/м). Просматривается прямая пропорциональная зависимость между значениями χ проб первичных

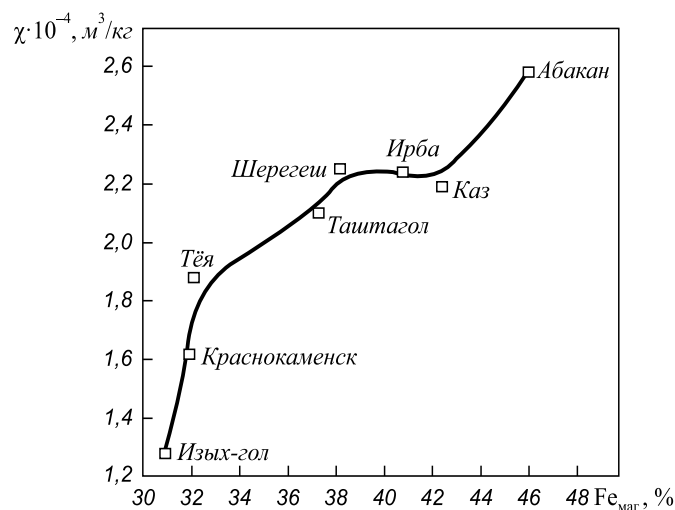


Рис. 1. Зависимость удельной магнитной восприимчивости от содержания в пробах различных месторождений железа магнетитового

Fig. 1. Dependence of specific magnetic susceptibility on the content of magnetite iron in the samplers of different deposits

концентратов и количеством в них магнетитового железа. Минимальные значения отмечены на слабоокисленном материале с месторождения Изых-Гола, наибольшее – на магнетитовом промпродукте Абаканского месторождения.

Максимумы удельной магнитной восприимчивости первичных концентратов и их поля, а также значения χ в полях $H = 80$ кА/м (наименьшее) и $H = 175$ кА/м (наибольшее) сведены в таблицу. Отметим, что значение поля максимума χ слабоокисленных руд выше таковых для магнетитовых руд: значения напряженности соответственно $H \approx 21$ кА/м (Изых-Гол) и $H \approx 12,4$ кА/м (Абакан). Максимумы значений χ первичных концентратов магнетитовых руд находятся в пределах от 6,84 (Абакан) до $5,29 \cdot 10^{-4}$ м³/кг, слабоокисленных же руд значительно меньше – от 4,32 до $2,26 \cdot 10^{-4}$ м³/кг (Изых-Гол).

Как известно, конечным продуктом мокрой многостадийной технологии обогащения первичных концентратов на Абагурской обогатительной фабрике является вторичный железорудный концентрат.

Представляет интерес сравнительная оценка величин удельной магнитной восприимчивости исходных первичных концентратов и конечного концентрата Абагурской фабрики. Из таблицы видно, что значения χ магнитных фракций значительно больше таковых немагнитных продуктов; поле же максимума удельной восприимчивости практически вдвое выше у немагнитной фракции. Просматривается аналогия с параметрами удельной магнитной восприимчивости на магнетитовых и слабоокисленных промпродуктах.

На рис. 2 представлены графики зависимости параметра χ магнитного и немагнитного продуктов разделения конечного концентрата от величины H . Вид зависимости удельной магнитной восприимчивости

**Удельная магнитная восприимчивость различных проб первичных концентратов и конечного концентрата
Абагурской аглофабрики в различных магнитных полях**

**Specific magnetic susceptibility of different samples of primary concentrates and finite concentrate
of Abagur sinter plant in different magnetic fields**

Проба руды месторождений		Максимум		$\chi \cdot 10^{-4}$, м ³ /кг, в поле H , кА/м	
		H , кА/м	$\chi \cdot 10^{-4}$, м ³ /кг	80	175
Тёя		11,83	4,32	1,88	0,25
Изых-Гол		21,04	2,26	1,28	0,35
Ирба		10,42	5,71	2,24	0,48
Абакан		12,37	6,84	2,58	0,52
Таштагол		9,68	5,29	2,10	0,34
Шерегеш		9,76	5,94	2,25	0,44
Каз		11,03	5,93	2,19	0,43
Краснокаменск		14,09	3,32	1,62	0,45
Концентрат конечный	Магнитный	10,90	1,40	0,26	0,03
	Немагнитный	19,50	40,10	20,30	4,00

продуктов разделения от величины напряженности магнитного поля подобен приведенным в литературе [9, 10] графикам $\chi(H)$ первичных концентратов – с максимумом χ в относительно слабых полях и «крутым» спадом в полях более 100 кА/м.

Лабораторные эксперименты свидетельствуют о взаимосвязи удельной магнитной восприимчивости, содержанием магнетитового железа в пробе и крупностью частиц концентрата.

По данным А.А. Бикбова промпродукты класса –0,5 мм обладают на 9–20 % большей удельной магнитной восприимчивостью в сравнении с таковыми класса –0,07 мм [5].

По данным Л.А. Ломовцева удельная магнитная восприимчивость частиц качканарского концентрата клас-

са –0,2 мм более чем в два раза превышает таковую частиц класса –0,04 мм в поле $H \approx 21$ кА/м, где параметр максимален [10]. Таким образом подтверждено, что удельная магнитная восприимчивость в процессе магнитной сепарации зависит от крупности частиц обогащаемого материала.

Изменение гранулометрического состава материала достигается предварительной его подготовкой в магнитном поле – флокуляцией. Отмечено, что удельная магнитная восприимчивость предварительно сфлуктурированного порошкового магнетита в поле $H = 14,3$ кА/м в 1,8 раза выше таковой несфлуктурированного магнетита [10].

Флокуляция сильномагнитных минералов (частиц магнетита и сростков магнетита с породой) описана в работах [11, 12]; новые методы магнитной обработки магнетитовых руд – в работе [13].

Положительный эффект от применения предварительной магнитной флокуляции материала получен на горно-обогатительных предприятиях Кривбасса – СевГОКе и ЦГОКе [14].

Авторы наблюдали на продуктах Абагурской фабрики как «наведенную» внешним магнитным полем флокуляцию, так и «собственную» – за счет остаточной намагниченности. Интервал напряженностей магнитных полей, в которых последовательно фиксировалась «наведенная», а затем «собственная» флокуляция, составил от 24 до 200 кА/м. С ростом крупности частиц флокуляция проявляется слабее, процесс «сдвигается» в более высокие поля; это характерно как для «наведенной», так и «собственной» флокуляции [15]. Можно сказать, что изменение гранулометрических параметров материала за счет магнитной флокуляции приводит к увеличению его удельной магнитной восприимчивости.

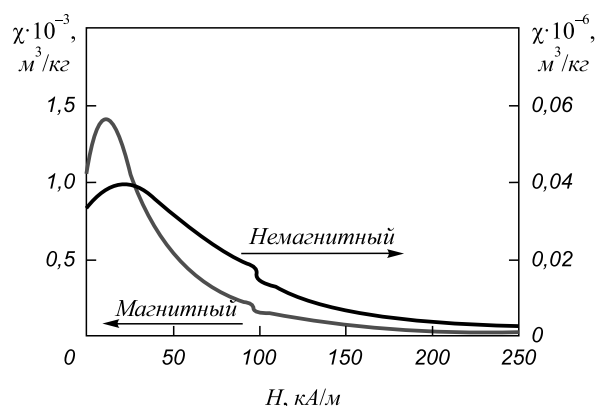


Рис. 2. Зависимость удельной магнитной восприимчивости продуктов разделения от величины напряженности магнитного поля (концентрат конечный класса –0,07 мм)

Fig. 2. Dependence of specific magnetic susceptibility of the separate products on the value of magnetic field strength (concentrate of finite class –0.07 mm)

Выводы. Измерены величины удельной магнитной восприимчивости χ проб первичных концентратов магнетитовых и слабоокисленных руд семи сибирских обогатительных фабрик. На графике зависимости удельной магнитной восприимчивости от содержания железа магнетитового в пробах прослеживается пропорциональность между этими параметрами. Поле максимума магнитной восприимчивости промпродуктов слабоокисленных руд больше его аналога для магнетитовых руд, значения же удельной магнитной восприимчивости на магнетитовых пробах выше. Проведено сравнение удельной магнитной восприимчивости первичных концентратов с таковой магнитного и немагнитного продуктов конечного концентрата Абагурской аглофабрики. Характер зависимости удельной магнитной восприимчивости от значений напряженности поля названных проб идентичен.

Предварительная флокуляция в магнитном поле регулирует гранулометрические параметры материала, создавая условия для увеличения магнитной восприимчивости. Необходимые параметры магнитного поля технически достижимы на обогатительных фабриках. Низкие значения удельной магнитной восприимчивости промпродуктов слабоокисленных руд подтверждают необходимость их мокрого обогащения в составе шихты с концентратами магнетитовых руд, что снизит потери в хвосты магнетита из слабоокисленных руд. Значения удельной магнитной восприимчивости промпродуктов могут использоваться при расчетах технологических режимов сепарации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кармазин В.В., Кармазин В.И. Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. Т. 1. Магнитные и электрические методы обогащения полезных ископаемых. – М.: изд. МГУ, 2005. – 670 с.
2. Килин В.И. Повышение эффективности магнитной сепарации магнетитовых руд. – Чита: изд. ЧитГУ, 2011. – 327 с.
3. Якубайлик Э.К., Килин В.И., Ганженко И.М., Чижик М.В., Килин С.В. Лабораторные исследования мокрой магнитной

сепарации первичных концентратов сибирских железорудных месторождений // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 2. С. 47 – 51.

4. Yakubailik E.K., Kilin V.I., Chizhik M.V., Ganzhenko I.M., Kilin S.V. Magnetic Characteristics of Primary Concentrates Supplied as a Feedstock to Abagyr Enrichment-Agglomeration Plant / Journal of mining science. 2013. Vol. 49. No. 1. P. 153 – 159.
5. Бикбов А.А., Крюковская Л.В. Магнитные свойства некоторых магнетитовых промпродуктов // Обогащение руд. 1974. № 5. С. 17 – 20.
6. Килин В.И., Якубайлик Э.К. Изучение магнитных свойств и процессов сепарации абаканских магнетитов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2002. № 5. С. 104 – 109.
7. Панов О.В., Ломовцев Л.А., Потапов В.Д. и др. Влияние предварительной магнитной флокуляции на процесс мокрой магнитной сепарации магнетитовых руд Соколовского и Сарбайского месторождений // Обогащение руд. 1980. № 5. С. 19 – 23.
8. Балаев А.Д., Бояршинов Ю.В., Карпенко М.М., Хрусталева Б.П. Автоматизированный магнитометр со сверхпроводящим соленоидом // Приборы и техника эксперимента. 1985. № 3. С. 167, 168.
9. Рычков Л.Ф., Ломовцев Л.А. Удельная магнитная восприимчивость сильномагнитных руд при различной напряженности магнитного поля // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1978. № 6. С. 108 – 110.
10. Ломовцев Л.А., Нестерова Н.А., Дробченко Л.А. Магнитное обогащение сильномагнитных руд. – М.: Недра, 1979. – 235 с.
11. Младецкий И.К. Оценка флокуляции сильномагнитного минерала в полях магнитных сепараторов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1979. № 6. С. 101 – 106.
12. Младецкий И.К., Боровик В.А. Оценка средней силы взаимодействия магнетитосодержащих частиц при флокуляции // Изв. вуз. Горный журнал. 1987. № 4. С. 118, 119.
13. Килин В.И., Килин С.В. Новые методы магнитной обработки магнетитовых руд с целью повышения эффективности их обогащения // Обогащение руд. 2008. № 5. С. 31 – 33.
14. Герасименко И.А., Ломовцев Л.А., Иголинская З.А. О целесообразности применения предварительной магнитной флокуляции материала // Горный журнал. 1991. № 2. С. 33, 34.
15. Якубайлик Э.К., Килин В.И., Чижик М.В., Ганженко И.М., Килин С.В. Изучение процессов намагничивания и размагничивания сильномагнитных руд методом цифровой фотографии // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 2. С. 5 – 11.

Поступила 20 июня 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 12, pp. 852–856.

SPECIFIC MAGNETIC SUSCEPTIBILITY OF IRON ORES OF SIBERIAN DEPOSITS

E.K. Yakubailik¹, I.M. Ganzhenko², P.Yu. Butov²

¹ Kirensky Institute of Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

² JSC “Evrazruda”, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

Abstract. The article contains the results of a study of the specific magnetic susceptibility of primary concentrates of Siberian iron ore deposits and its dependence on the magnetic field of the separator. The experiments (laboratory separation, magnetic measurements) were performed on the class size of –0.07 mm. Study of ore subjected to seven deposits, four of which are magnetite and three – lightly oxidized, due to their content of martite, hematite and limonite from 3% to 6%. The middlings of magnetite ore have the largest values of magnetic susceptibility, the middlings of lightly oxidized ores have the less value. But

the fields of maximum specific susceptibility of lightly oxidized ore samples are higher than the maximum specific susceptibility of magnetite middlings samples. The experiments have shown that the values of specific magnetic susceptibility of primary concentrates are proportional to the content of magnetite iron in them.

Keywords: specific magnetic susceptibility, primary concentrate, magnetite, lightly oxidized ore, magnetite iron.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-852-856

REFERENCES

1. Karmazin V.V., Karmazin V.I. *Magnitnye, elektricheskie i spetsial'nye metody obogashcheniya poleznykh iskopaemykh. T. 1. Magnitnye i elektricheskie metody obogashcheniya*

- poleznykh iskopaemykh* [Magnetic, electric and special methods of enrichment of mineral resources. Vol. 1. Magnetic and electrical methods of mineral processing]. Moscow: MGGU, 2005, 670 p. (In Russ.).
2. Kilin V.I. *Povyshenie effektivnosti magnitnoi separatsii magnetitovykh rud* [Efficiency increase of magnetic separation of magnetite ores]. Chita: ChitGU, 2011, 327 p. (In Russ.).
3. Yakubailik E.K., Kilin V.I., Ganzhenko I.M., Chizhik M.V., Kilin S.V. The laboratory investigations of wet magnetic separation of the primary concentrates from the Siberian iron-ore deposits. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 2, pp. 47–51. (In Russ.).
4. Yakubailik E.K., Kilin V.I., Chizhik M.V., Ganzhenko I.M., Kilin S.V. Magnetic characteristics of primary concentrates supplied as a feedstock to Abagyr enrichment-agglomeration plant. *Journal of Mining Science*. 2013, vol. 49, no. 1, pp. 153–159.
5. Bikbov A.A., Kryukovskaya L.V. Magnetic properties of some magnetite industrial products. *Obogashchenie rud*. 1974, no. 5, pp. 17–20. (In Russ.).
6. Kilin V.I., Yakubailik E.K. Investigation into magnetic properties and processes of separation of Abakan Magnetites. *Journal of Mining Science*. 2002, vol. 38, no. 5, pp. 508–511.
7. Panov O.V., Lomovtsev L.A., Potapov V.D. etc. Influence of magnetic flocculation on the process of wet magnetic separation of magnetite ores of Sokolovsky and Sarbaisky deposits. *Obogashchenie rud*. 1980, no. 5, pp. 19–23. (In Russ.).
8. Balaev A.D., Boyarshinov Yu.V., Karpenko M.M., Khrustalev B.P. Automated magnetometer with superconducting solenoid. *Instruments and experimental techniques New York*. 1985, vol. 28, no. 3, pp. 685–687.
9. Rychkov L.F., Lomovtsev L.A. Magnetic susceptibility of strongly magnetic ores at different magnetic field intensities. *Soviet Mining Science*. 1978, vol. 14, no. 6, pp. 623–625.
10. Lomovtsev L.A., Nesterova N.A., Drobchenko L.A. *Magnitnoe obogashchenie sil'nomagnitnykh rud* [Magnetic enrichment of strongly magnetic ores]. Moscow: Nedra, 1979, 235 p. (In Russ.).
11. Mladetskii I.K. Estimating flocculation of a strongly magnetic mineral in the fields of magnetic separators. *Soviet Mining Science*. 1979, vol. 15, no. 6, pp. 620–624.
12. Mladetskii I.K., Borovik V.A. Essence of average interaction force of magnetite-containing particles at the flocculation. *Izvestiya VUZov. Gornyi zhurnal*. 1987, no. 4, pp. 118, 119. (In Russ.).
13. Kilin V.I., Kilin S.V. New methods of magnetic treatment of magnetite ores in order to increase the efficiency of the enrichment. *Obogashchenie rud*. 2008, no. 5, pp. 31–33. (In Russ.).
14. Gerasimenko I.A., Lomovtsev L.A., Igolinskaya Z.A. On the usefulness of preliminary magnetic flocculation of the material. *Gornyi zhurnal*. 1991, no. 2, pp. 33, 34. (In Russ.).
15. Yakubailik E.K., Kilin V.I., Chizhik M.V., Ganzhenko I.M., Kilin S.V. Study of strong-magnetic ores magnetization and demagnetization processes by the method of digital photography. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 2, pp. 5–11. (In Russ.).

Information about the authors:

E.K. Yakubailik, Cand. Sci. (Phys.-math.), Senior Researcher
(churilov@iph.krasn.ru)
I.M. Ganzhenko, Engineer (a.ganzhenko@mail.ru)
P.Yu. Butov, Chief Preparator (Pavel.Butov@evraz.com)

Received 20 June, 2016

УДК 669.162.12:622

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОСИЛОВОГО НАПЫЛЕНИЯ ВЛАЖНОЙ ШИХТЫ

*Павловец В.М., к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики
и экологии (pavlovets.victormix@yandex.ru)*

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

Аннотация. Показаны возможности формирования структуры железорудных окатышей с дифференцированным распределением пористости по сечению гранул, полученных с использованием теплосилового напыления влажной шихты. С помощью видеосъемки и анализа макроструктуры напыленного слоя шихты, являющегося матрицей для получения зародышевых центров, дано описание механизма формирования напыленного слоя шихты и роста его геометрических размеров. Установлено, что формирование напыленного слоя шихты начинается с образования и роста очагов напыления. Выяснено, что в основе механизма формирования пористости окатышей лежит сдвиговая деформация шихты за счет проявления сил трения между потоком воздуха и поверхностью напыленного слоя. Установлено, что теплосиловое напыление влажной шихты на шихтовый гарнисаж формирует напыленный слой с повышенной долей открытых пор по всему сечению. Величина открытой пористости напыленного слоя зависит от расстояния до напыляемой поверхности и точки на поверхности шихтового гарнисажа окомкователя, в которой организовано напыление. Получено распределение открытых и закрытых пор в объеме окатышей в зависимости от массовой доли зародышевых центров, полученных теплосиловым напылением влажной шихты.

Ключевые слова: теплосиловое напыление влажной шихты, дифференцированное распределение пористости, характер изменения пористости, открытые и закрытые поры, зародыши, железорудные окатыши.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-857-863

Технологическая схема производства железорудных окатышей включает окомкование шихты с получением влажных окатышей на низкотемпературной стадии процесса и упрочняющую термическую обработку окомкованного сырья на высокотемпературной стадии производства, после которой получают окисленные окатыши, пригодные для длительной транспортировки к потребителям и последующей плавки или металлизации. Упрочняющая термическая обработка окатышей в режимах сушки, подогрева и обжига осуществляется на обжиговых конвейерных машинах, где и формируются пористость и межчастичная минеральная связка. Формирование формы, размеров и характера (открытая, закрытая) пористости в процессе обжига являются трудноконтролируемыми, поскольку на эти процессы накладываются многочисленные сопутствующие физико-химические процессы. Применяя методы струйного теплосилового напыления влажной шихты на шихтовый гарнисаж или на комкуемые материалы в рабочем пространстве окомкователя [1 – 3], можно снизить затраты на тепловую обработку окатышей, увеличить производительность технологических агрегатов и сформировать дифференцированную структуру, благоприятную для последующего обжига и заключительной восстановительно-тепловой обработки.

Целью настоящей работы является исследование механизма формирования структуры окатышей на низкотемпературной стадии производства, основанной на

струйном теплосиловом напылении влажной шихты на шихтовый гарнисаж и комкуемые материалы в рабочем пространстве окомкователя.

В процессе работы тарельчатого окомкователя по технологии зародышеобразования напылением и доокомкования (ЗНД) на днище тарели в рабочей зоне окомкователя из влажной шихты формируется шихтовый гарнисаж (ШГ), который выходит на поверхность холостой зоны в верхней четверти тарели. На гарнисаж влажная шихта напыляется низкотемпературными воздушно-шихтовыми струями (ВШС), формируется плотный напыленный слой (НС). Этот напыленный слой шихты, принудительно разделенный на множество зародышевых фрагментов и очищенный до заданной толщины, вместе с верхней частью гарнисажа являются шихтовой матрицей для получения зародышей с дифференцированной пористостью. Из холостой зоны зародыши поступают в рабочую зону окомкователя, где увлажняются и комкуются влажной шихтой до размеров кондиционных окатышей. Влажные окатыши по технологии ЗНД структурно состоят из расположенных в центре (сердцевине) зародышей влажностью $W_{зр} = (0,92 \div 0,94)W_{ш}$ и плотностью $\rho_{зр} = 2400 \div 3200 \text{ кг/м}^3$ и шихтовой оболочки влажностью $W_{об} = (1,0 \div 1,1)W_{ш}$ и плотностью $\rho_{об} = 3200 \div 3600 \text{ кг/м}^3$ (где $W_{ш}$ – влажность загружаемой шихты, %) [1 – 3].

Механизм формирования структуры напыленного слоя шихты исследовали на контрастном гарнисаже,

выполненном из утрамбованного влажного известняка ($W_n = 9,8\%$, $\rho_n = 2480 \text{ кг/м}^3$, $d_n < 0,1 \text{ мм}$); в процессе напыления с помощью видеосъемки (частота съемки 25 и 30 кадров в секунду) фиксировали среднее значение (в трех направлениях) диаметра (d , мм), высоту (h , мм) напыленного слоя на его оси и макроструктуру поверхности НС (рис. 1, а). Шихту тейского железорудного концентрата ($d_q = 0,068 \text{ мм}$, $W_{ш} = 8,25\%$) расходом $0,01 \text{ кг/с}$ напыляли струйным аппаратом (СА) с относительного расстояния $L/d_{ca} = 5 \div 50$ (где L и d_{ca} – расстояние от среза сопла СА до гарнисажа и диаметр сопла СА, м). Угол атаки СА к гарнисажу (β) составлял 45 и 90°. Схема отбора проб показана на рис. 1, б. Техника отбора проб подробно описана в работе [3].

Для определения плотности напыленного слоя ρ использовали цилиндрические образцы правильной формы, вырезанные методом режущего кольца (ГОСТ 5180 – 84) [4]. Для этого в каждой зоне НС вырезали 10 – 15 образцов диам. 15 мм прободоотборником (режущим кольцом), высоту которого (5 – 15 мм) подбирали экспериментально. Размеры зон НС уста-

навливали в зависимости от безразмерного текущего радиуса $d = r_i/r$ (где r_i – текущее значение радиуса НС; r – радиус НС, м; i – порядковый номер зоны (I, II, III)). Зона I находилась в центре НС (на оси струи) в круге радиусом r_1 . Параметр d_1 этой зоны изменяется от нуля до 0,2. Зона II ($d_2 = 0,2 \div 0,6$) примыкает к зоне I и занимает кольцевое пространство, ограниченное радиусом r_1 (внутренний) и r_2 (наружный). Периферийная зона III ограничена кольцами радиусами r_2 и r ($d_3 = 0,6 \div 1,0$). Образцы взвешивали на лабораторных аналитических весах ВЛР-200 (второго класса, ГОСТ 19491 – 74, точность до 0,0001 г) и на электронных весах VIBRA серии AF-R220 CE (Япония). Высоту влажных образцов измеряли микрометром МК-25 с точностью до 0,01 мм. Пористость (открытую $P_{отк}$, закрытую P_3 и общую P_o , %) определяли по стандартной методике (ГОСТ 25732 – 88, Методика определения истинной, объемной, насыпной плотности и пористости), дублируя результаты экспериментов. Макроструктуру поверхности НС (увеличение 5 – 10) фотографировали цифровым многофункциональным электронным фотоаппаратом SONY модели MVC-FD71 (Digital Still Camera 3-050-482.01). Результаты опытов по первой серии экспериментов представлены на рис. 2 – 6 и в таблице.

Во второй серии опытов по вышеописанной методике получали сферокубические зародыши размерами (высота ребра) 5, 10, 12 мм и средней плотностью 2910 кг/м^3 делением НС в его центральной зоне. Для этого напыленный слой формировали на тарельчатом окомкователе диам. 0,62 м, работающем с частотой 6 об./мин и наклоненном к горизонту под углом 45°, напыляя влажную шихту в точку с координатой $X(R) = 0,5$ (где $X(R) = R_i/R$; R_i – расстояние до точки напыления, м; R – радиус тарели, м). После этого зародыши доокомковывали в режиме переката до окатышей размером 16 мм, подавая в слой зародышей влажную шихту до массового соотношения шихта–зародыши, равного 4. Одновременно слой увлажняли тонкораспыленным потоком воды. Полученные окатыши сушили при температуре 300 °С в течение 15 мин, затем обжигали при температуре 1200 °С в течение 10 мин.

Во второй серии опытов исследовали влияние соотношения массы зародыша в окатыше к массе окатыша ($m_{зр}/m_{ок}$) на плотность и пористость окатышей. Результаты опытов представлены на рис. 7.

Установлено (рис. 3, 4), что при напылении шихты на контрастную основу в первый момент времени образуется около 30 – 50 очагов первичного напыления, на которых происходит коалесценция подлетающих частиц и формируется напыленный слой. Очаги растут, перекрывая друг друга, и по истечении 0,4 – 0,6 с образуют сплошной массив напыленной шихты. Наибольшие размеры НС и его масса получены при напылении влажной ($W_{ш} = 7 \div 10\%$) шихты на влажную ($W_{ш} = 7 \div 10\%$) контрастную основу. Все остальные сочетания напыления дают заведомо худшие (меньшие

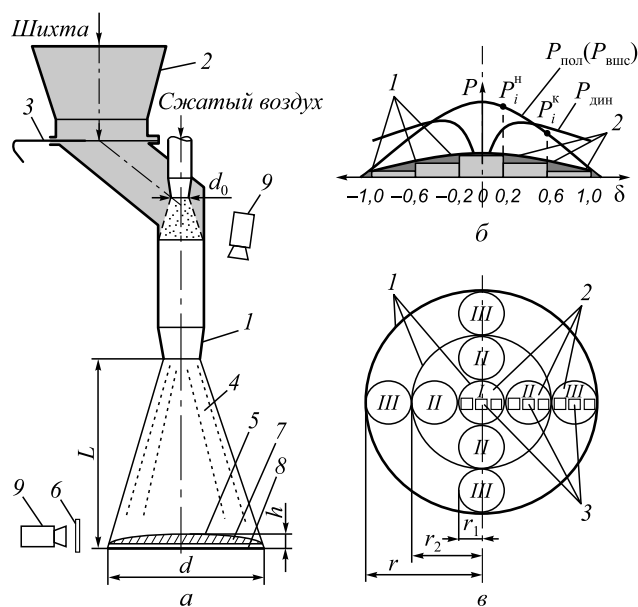


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для видеосъемки процесса напыления влажной шихты на контрастную поверхность (а), поле давлений струи на поверхности напыленного слоя (б) и схема взятия образцов в зонах I – III (в):

а: 1 – струйный аппарат; 2 – бункер шихты; 3 – шибер; 4 – воздушно-шихтовая струя; 5 – напыленный слой шихты; 6 – защитный стеклянный экран; 7 – контрастная основа; 8 – опора; 9 – видеокамера
б и в: 1 – граница зон; 2 – расположение образцов в зонах НС; 3 – место фотосъемки

Fig. 1. Scheme of the experimental unit for making video of the process of wet charge spraying to the contrast surface (а), field of the jets pressure on surface of the sprayed layer (б), and the sampling scheme in zones I – III (в):

а: 1 – jet apparatus; 2 – charge bunker; 3 – gate; 4 – air-charge jet; 5 – sprayed layer of charge; 6 – protective glass screen; 7 – contrast base; 8 – support; 9 – camera
б and в: 1 – the zones boundaries; 2 – location of the samples in the areas of the sprayed layer; 3 – shooting place

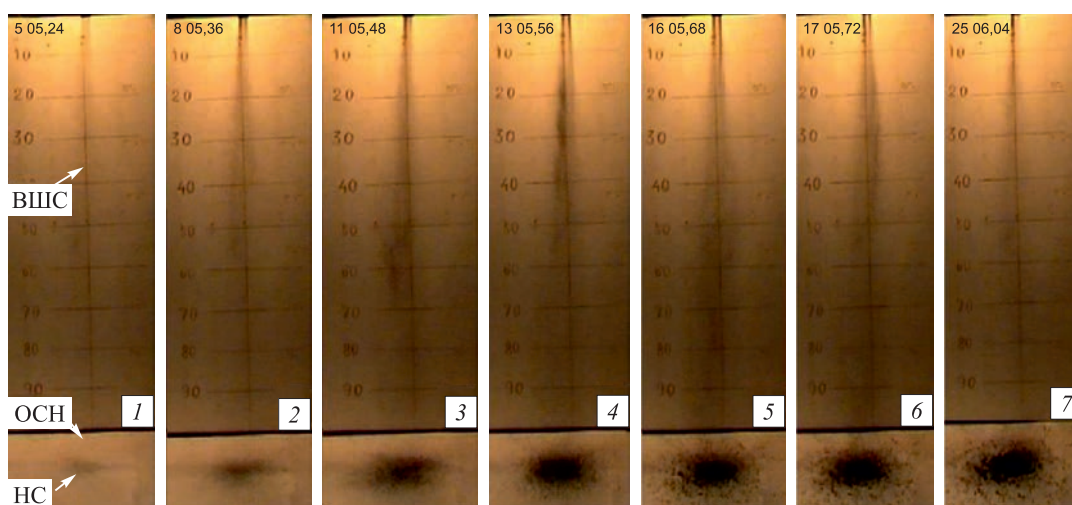


Рис. 2. Кинетика формирования воздушно-шихтовой струи и напыленного слоя на влажной ($W_{\text{шг}} = 9,8\%$) контрастной основе ($L/d_{\text{ca}} = 50$, $N = 25 \text{ с}^{-1}$) при времени съемки, с:
1 – 0,16; 2 – 0,28; 3 – 0,40; 4 – 0,52; 5 – 0,64; 6 – 0,68; 7 – 1,00

Fig. 2. Kinetics of the formation of charge air jet and the sprayed layer ($W_{\text{шг}} = 9.8\%$) on the contrast base ($L/d_{\text{ca}} = 50$, $N = 25 \text{ s}^{-1}$) with the shooting time, s:
1 – 0.16; 2 – 0.28; 3 – 0.40; 4 – 0.52; 5 – 0.64; 6 – 0.68; 7 – 1.00

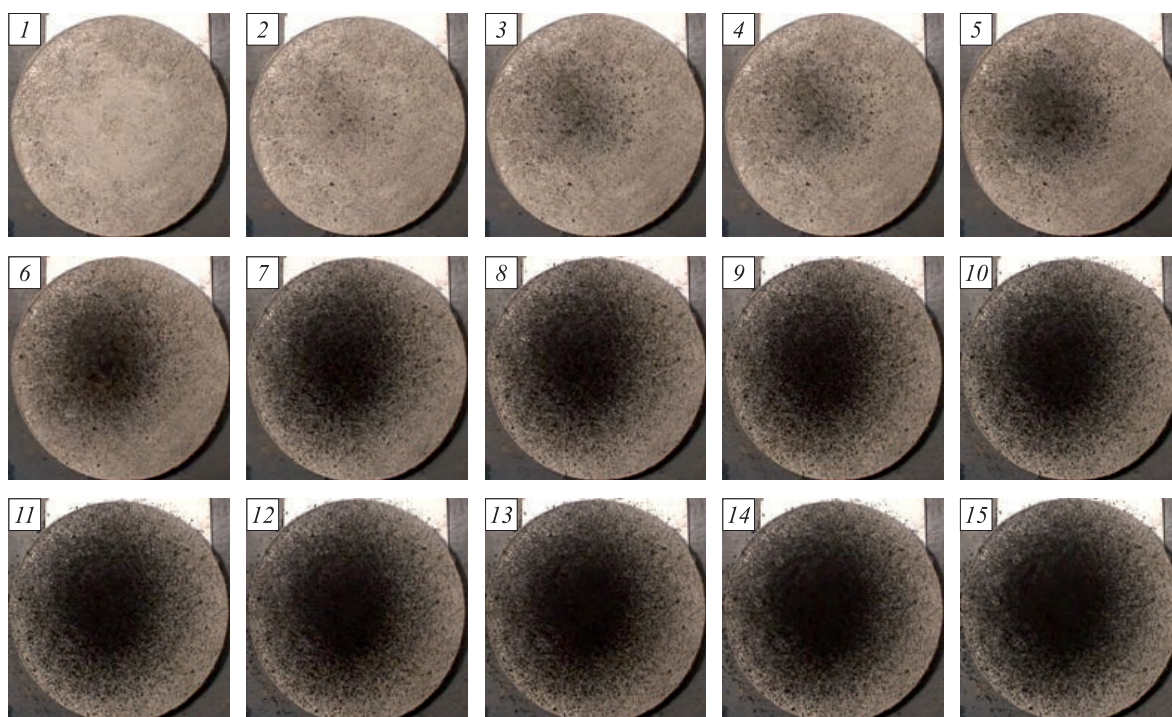


Рис. 3. Кинетика формирования напыленного слоя шихты на влажной ($W_{\text{шг}} = 9,8\%$) контрастной основе ($N = 30 \text{ с}^{-1}$) при времени съемки, с:
1 – 0; 2 – 0,067; 3 – 0,133; 4 – 0,200; 5 – 0,233; 6 – 0,267; 7 – 0,400; 8 – 0,600; 9 – 0,700; 10 – 0,900; 11 – 1,033; 12 – 1,233;
13 – 1,367; 14 – 1,500; 15 – 1,667

Fig. 3. Kinetics of the formation of charge layer sprayed on the wet ($W_{\text{шг}} = 9.8\%$) contrast basis ($N = 30 \text{ s}^{-1}$) with the shooting time, s:
1 – 0; 2 – 0.067; 3 – 0.133; 4 – 0.200; 5 – 0.233; 6 – 0.267; 7 – 0.400; 8 – 0.600; 9 – 0.700; 10 – 0.900; 11 – 1.033; 12 – 1.233;
13 – 1.367; 14 – 1.500; 15 – 1.667

на 15 – 20 %) результаты по размерам НС, а при напылении сухой шихты на сухую основу наблюдается пескоструйный эффект.

Подобная зародышевая схема формирования напыленного слоя характерна для металлических частиц

и торкретмасс [5] с размерами зерен 10 – 70 мкм [6]. Оптимальным зерновым составом для формирования равномерного НС при торкретировании является фракция менее 0,074 мм в количестве 80 %. Во влажном напыленном слое сцепление частиц происходит

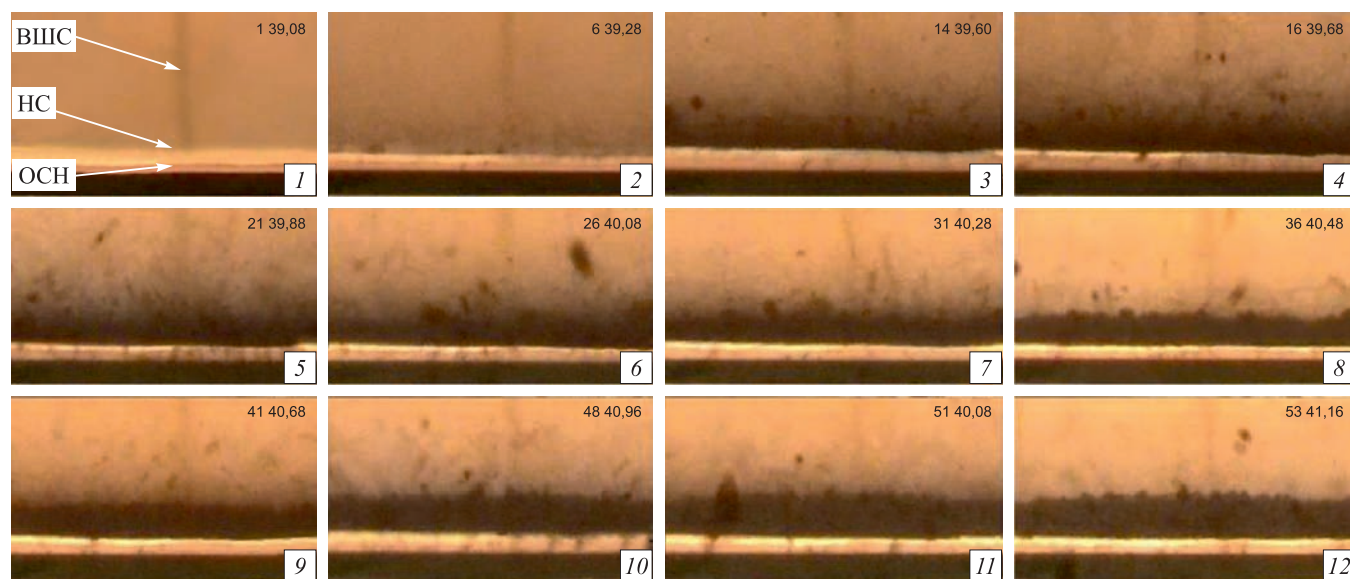


Рис. 4. Кинетика формирования напыленного слоя шихты (поперечное сечение) на влажной контрастной основе при времени съемки, с: 1 – 0; 2 – 0,20; 3 – 0,52; 4 – 0,60; 5 – 0,80; 6 – 1,00; 7 – 1,20; 8 – 1,40; 9 – 1,60; 10 – 1,88; 11 – 2,00; 12 – 2,08

Fig. 4. Kinetics of the formation of the charge layer (transverse section) sprayed on the wet contrast basis with a shooting time, s: 1 – 0; 2 – 0.20; 3 – 0.52; 4 – 0.60; 5 – 0.80; 6 – 1.00; 7 – 1.20; 8 – 1.40; 9 – 1.60; 10 – 1.88; 11 – 2.00; 12 – 2.08

за счет механического зацепления, контактных сил Ван-дер-Ваальса, электрической адгезии, адсорбционных, капиллярных сил [7]. При этом силы сцепления и уплотняемость конгломератов частиц с уменьшением размеров частиц увеличиваются [7]. Авторы работ [5, 8] отмечают, что при скорости частицы 50 м/с и длительности ударного взаимодействия $10^{-5} - 10^{-7}$ с частица способна формировать на металле лунку глубиной до 0,1 мкм, деформированную зону до 10 мкм и развивать при ударе давление до 700 – 2000 МПа.

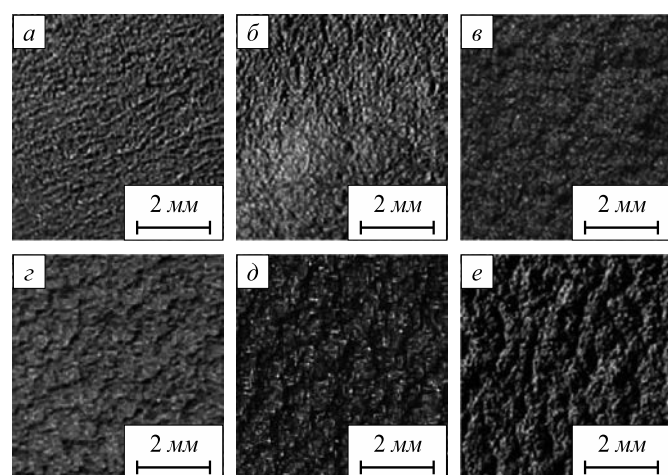


Рис. 5. Макроструктура шихтового гарнисажа (а) и напыленного слоя (б – е):
б – $\delta = 0$; $\beta = 90^\circ$; в – $\delta = 0,2$; $\beta = 90^\circ$; г – $\delta = 0,5$; $\beta = 90^\circ$;
д – $\delta = 0,5$; $\beta = 45^\circ$; е – $\delta = 0,6$; $\beta = 45^\circ$

Fig. 5. Macrostructure of the charge skull (a) and the sprayed layer (b – e):
б – $\delta = 0$; $\beta = 90^\circ$; в – $\delta = 0.2$; $\beta = 90^\circ$; г – $\delta = 0.5$; $\beta = 90^\circ$;
д – $\delta = 0.5$; $\beta = 45^\circ$; е – $\delta = 0.6$; $\beta = 45^\circ$

В течение первых 0,1 – 0,2 с (рис. 2, 3) с момента распространения струи (несмотря на высокую влажность основы) поверхность деформируется частицами из-за пескоструйного эффекта, шихта отскакивает, формируя плотное облако взвешенных частиц (рис. 4). На фотоснимках видно затемнение, вызванное повышением концентрации частиц, отлетевших от основы. Подобное зафиксировано в работах [8, 9], где отмечается влияние отраженных от основы частиц на структуру газового потока. В ходе формирования очагов напыления происходит сегрегация частиц по крупности: в зоне I содержание частиц фракции 0 – 0,05 мм пре-

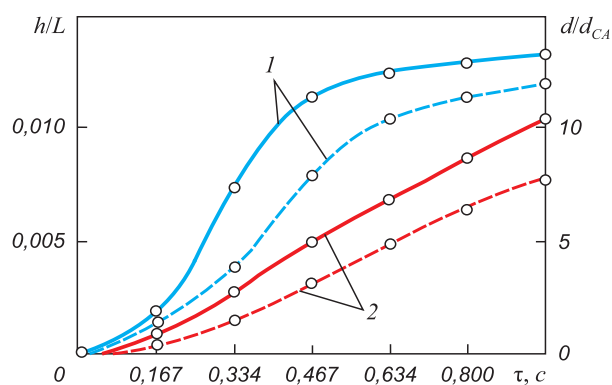


Рис. 6. Изменение геометрических размеров напыленного слоя, сформированного на влажной ($W_{\text{шр}} = 9,8\%$) (—) и сухой ($W_{\text{шр}} = 0$) (---) контрастной основе: 1 – диаметр; 2 – высота напыленного слоя

Fig. 6. Changes in the geometrical dimensions of the sprayed layer formed on the wet ($W_{\text{шр}} = 9.8\%$) (—) and dry ($W_{\text{шр}} = 0$) (---) contrast basis: 1 – diameter; 2 – height of the sprayed layer

Пористость образцов, вырезанных из НС, после их обжига

Porosity of samples cut from the sprayed layer after their burning

$X(R)$	Зона НС (δ)	$\rho_{\text{каж}}$, кг/м ³	Π_o , %	$\Pi_{\text{отк}}$, %	Π_z , %
0	0 – 0,2	3240/2916/2630	34,4/40,1/46,7	24,3/30,4/38,6	10,1/9,7/8,1
	0,2 – 0,6	3110/2810/2585	37,0/43,1/47,7	26,9/33,6/40,5	10,0/9,5/7,2
	0,6 – 1,0	2960/2705/2512	40,0/45,2/49,1	30,6/36,2/42,6	9,4/9,0/6,5
0,5	0 – 0,2	3148/2820/2558	36,2/42,9/48,2	26,0/34,1/40,9	10,2/8,8/7,3
	0,2 – 0,6	3006/2715/2510	39,1/45,0/49,1	29,9/37,4/42,1	9,2/7,6/7,0
	0,6 – 1,0	2854/2612/2460	42,2/47,1/50,2	33,1/38,7/43,8	9,1/8,4/6,4
0,9	0 – 0,2	3105/2770/2522	37,1/43,9/48,9	27,5/36,1/41,8	9,6/7,8/7,1
	0,2 – 0,6	2954/2665/2480	40,2/46,0/49,8	31,2/38,4/42,8	9,0/7,6/7,0
	0,6 – 1,0	2802/2586/2426	43,2/47,6/50,9	34,7/41,1/44,7	8,5/6,5/6,2

Примечание: Через косую приведены значения при $L/d_{\text{са}}$ 5, 10 и 15; $\Pi_o = (1 - \rho_{\text{каж}}/\rho_{\text{ист}})100$ %; $\rho_{\text{ист}} = 4936$ кг/м³; температура обжига 1200 °С; время обжига 10 мин; $X(R)$ – радиальная координата тарели окомкователя.

вышает концентрацию частиц этой фракции в зоне III НС на 10 – 15 %. В начале напыления крупные зерна (размер частиц более 0,2 мм) отскакивают, а налипают после того, как сформируется слой толщиной 1 – 2 мм из тонких частиц фракции менее 0,074 мм. Аналогичный вывод отмечают авторы работы [10]. После формирования очагов напыления отскок частиц уменьшается, высота напыленного слоя резко, практически линейно растет (рис. 6). Диаметр напыленного слоя шихты формируется с максимальной скоростью в течение первых 0,5 – 0,6 с, после чего его рост замедляется, поскольку прирост массы идет в границах ВШС. Известно, что энергетическая неоднородность и очаги напыления формируются при механической обработке основы [5, 11], поэтому образование очагов напыления можно интенсифицировать искусственной шероховатостью шихтового гарнисажа и его направленной очисткой на окомкователе. Это способствует сокращению периода формирования НС максимального размера.

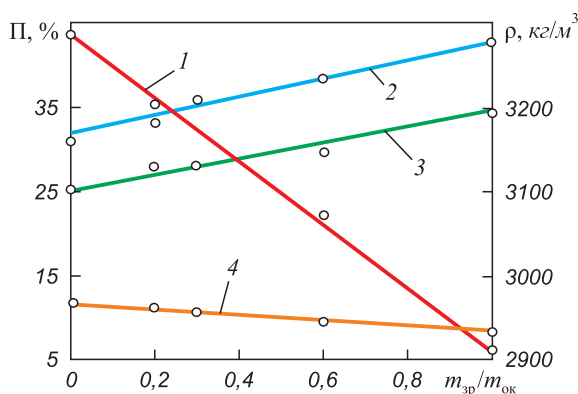


Рис. 7. Зависимость кажущейся плотности (1) и общей, открытой и закрытой пористости (2, 3 и 4) обожженных окатышей от массовой доли зародышей в окатышах

Fig. 7. Dependence of the seaming density (1) and total porosity, open and closed porosity (2, 3 and 4) of the burnt pellets on the mass fraction of the germs in the pellets

В работах [11, 12] отмечается, что пневматическое напыление отождествляется с непрерывным трамбованием, при котором прочность напыленного слоя в 2,5 – 3,0 раза выше, чем прочность слоя, полученного механическим трамбованием. Автор работ [12, 13] объясняет это положение более эффективным энергетическим взаимодействием летящей частицы с напыляемой поверхностью.

Если учесть, что при формировании ВШС в потоке влажной шихты и воздуха образуются шихтовые конгломераты [1 – 3], то при их массе 0,03 – 0,15 г и скорости их у основы до 40 – 50 м/с ($d_{\text{ок}} = 0,5 \div 2,0$ мм, $\rho_{\text{ок}} = 1550 \div 1620$ кг/м³) они способны удариться о контрастный гарнисаж с силой до $10^{-2} \div 10^{-3}$ Н, оказывая давление на поверхность преграды более $10^4 - 10^6$ Па. В момент удара о поверхность основы давление на гарнисаж, ориентировочно, в 10 – 15 раз выше, чем в конце напыления, так как площадь контактной поверхности в порошковых системах составляет всего 0,01 % от общей площади контактирующих частиц [5].

Одновременно с напылением шихты происходит инерционная пропитка влагой пограничной зоны между НС и основой. При ударе более инерционная и подвижная влага сравнительно легко проникает через поры на поверхность НС и в шихтовый гарнисаж, и, по-видимому, формирует открытую пористость. Подобное происходит при течении многофазной гетерогенной среды по проницаемой поверхности: газовая фаза просачивается, а твердая осаждается на ней [14, 15]. Поскольку плотность НС в момент удара ниже плотности основы, то часть влаги выжимается на поверхность НС и формирует гидросмесь (рис. 5), создавая благоприятные условия для напыления.

Результаты экспериментов (см. таблицу) показывают, что общая и открытая пористость НС возрастают пропорционально увеличению $L/d_{\text{са}}$, падению среднего давления ВШС ($P_{\text{вшс}}$) и росту координаты d в направлении от оси НС к его периферии. Причем, как показыва-

ют эксперименты (рис. 7), структурные характеристики (общая, открытая и закрытая пористости) окатышей существенно зависят от массовой доли зародышей в объеме окатышей.

В каждой из зон НС (*I–III*) (рис. 5) существуют заметно выраженные структурные особенности. В центральной зоне *I* ($d = 0 \div 0,2$) макроструктура НС преимущественно характеризуется наличием на его поверхности тонкого слоя подвижной влагошихтовой пульпы (гидросмеси) влажностью более 12 %. Под действием напора воздуха гидросмесь легко растекается, заполняя неровности рельефа на поверхности и, по-видимому, в глубине НС. Небольшие шихтовые наплывы появляются на границе зоны ($d = 0,15 \div 0,20$) после подсушки шихты и повышения ее вязкости. Плотность НС в зоне *I* может возрасти до 3240 кг/м^3 , а пористость уменьшиться до 26,5 – 27,2 %. Во всех зонах НС преимущественно формируется открытая пористость (см. таблицу).

Особенностью макроструктуры НС в зоне *II* ($d = 0,2 \div 0,6$) является наличие неглубоких (ориентировочно 0,1 – 0,3 мм) и протяженных (до 1,5 – 3,5 мм) поровых каналов, расположенных перпендикулярно линиям тока воздушного потока. При $\beta = 90^\circ$ поровые каналы более многочисленны, их извилистость повышается (рис. 5). При острых углах атаки струи ($\beta = 45^\circ$) число поровых каналов уменьшается, но их протяженность возрастает. Формирование этих пор обусловлено сдвиговой деформацией влажной шихты на поверхности НС, которая, в свою очередь, связана с величиной и характером динамического давления ($P_{\text{дин}}$) воздуха, движущегося на поверхности НС. Динамическое давление (рис. 1, б) воздуха меняется от нуля на оси НС до максимального значения в зоне *II* ($d = 0,3 \div 0,4$), после чего падает до минимального значения в зоне *III*. При течении воздуха на поверхности НС возникают силы трения, которые приводят к сдвигу сырой массы в радиальном направлении НС, воздействуют на структуру НС. Таким образом, формируется открытая пористость. Течение влажной шихты в радиальном направлении НС способно увеличить его геометрические размеры. В основе деформации НС лежат высокая пластичность влажной шихты и сила трения на границе НС и струи, которые формируют «гофрированную» поверхность, на которой «гофры» представлены уплотненными шихтовыми наплывами, а впадины – поперечными проницаемыми капиллярными каналами. При $L/d_{\text{ca}} \geq 20$ глубина пор и их извилистость уменьшаются, расстояние между ними возрастает, структурные отличия в зонах НС исчезают. При $L/d_{\text{ca}} < 5$ такие поры в зоне *I* и частично в зоне *II* визуально не наблюдаются, поскольку при высоких давлениях ВШС и влажности шихты влага выжимается на поверхность НС, формируя тонкий слой подвижной влагошихтовой пульпы, которая заполняет извилистые каналы и разглаживает поверхность НС. В этих условиях возможности формирования открытой пористости снижаются.

Макроструктура поверхности напыленного слоя в зоне *III* ($d = 0,6 \div 1,0$) (рис. 5) также характеризуется извилистыми каналами, глубина которых растет с уменьшением угла атаки ВШС. Это обусловлено тем, что плотность НС и сила сцепления с напыляемой основой в этой зоне меньше, чем в зонах *I* и *II*, поэтому деформируемость НС более высокая. Высота НС в этой зоне минимальная и колеблется от 4 – 5 мм ($d = 0,6$) до 1,0 – 1,5 мм ($d = 1,0$). Воздух, поступающий из зон *II* и *III*, движется параллельно поверхности НС, поэтому шихтовая пульпа в этой зоне образоваться не может, а сдвиговые усилия, ответственные за деформацию НС, снижаются. В общем случае пористость НС с ростом d от 0,6 до 1,0 растет, а плотность падает. При некоторых режимах напыления на поверхности НС появляются шихтовые жгутики, продолговатые конгломераты, образовавшиеся при перекате материалов и заполнившие неровности (впадины и макродефекты). За границами НС ($d > 1,0$) можно обнаружить большое количество крупных конгломератов частиц, образовавшихся при перекате шихты по НС.

Грубая шихта формирует более пористый и менее плотный НС и повышает вероятность появления пескоструйного эффекта. Следует заметить, что шихта с размером частиц более 0,1 мм трудно комкуется в режиме переката с образованием окатышей. Однако НС из грубых частиц размером более 0,1 мм формируется достаточно стабильно.

Выводы. Предложены новые принципы формирования структуры в процессе получения влажных окатышей за счет использования технологии принудительного зародышеобразования на низкотемпературной стадии производства. В основу принудительного зародышеобразования положен метод внешнего теплосилового напыления влажной железорудной шихты на шихтовый гарнисаж в рабочем пространстве окомкователя, которое позволяет менять величину и характер пористости окатышей. Формирование окатышей с повышенной долей открытой пористости дает возможность прогнозировать повышение их реакционной способности при последующей восстановительно-тепловой обработке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павловец В.М. Принципы организации принудительного зародышеобразования в холостой зоне тарельчатого окомкователя // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 4. С. 3 – 6.
2. Павловец В.М. Исследование процесса получения влажных окатышей с использованием принудительного зародышеобразования // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 6. С. 15 – 20.
3. Павловец В.М. Исследование структурных характеристик шихтового покрытия, напыленного на поверхность железорудных материалов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2004. № 4. С. 7 – 12.
4. Лабораторные работы по грунтоведению / В.Т. Трофимов, В.А. Королев, Е.А. Вознесенский и др. – М.: Высшая школа, 2008. – 519 с.
5. Анциферов В.Н., Бобров В.Г., Дружинин Л.К. Порошковая металлургия и напыленные покрытия. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.

6. Великин Б.А. Торкретирование металлургических печей. – М.: Металлургия, 1972. – 280 с.
7. Дик И.Г., Югов В.И. О моделировании структуры насыпного слоя // Инженерно-физический журнал. 2005. Т. 78. № 2. С. 36 – 43.
8. Гавин Л.В., Наумов В.А. Турбулентная двухфазная среда и ее численное исследование // Инженерно-физический журнал. 1983. Т. 44. № 6. С. 927 – 932.
9. Циркунов Ю.М. Влияние вязкого пограничного слоя на осаждение частиц при обтекании сферы газовзвесью // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. 1982. № 1. С. 59 – 66.
10. Лозовский В.А. Торкретирование металлургических печей. – М.: Металлургия, 1968. – 176 с.
11. Бобров В.Г., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий. – М.: Интермет инжиниринг, 2004. – 624 с.
12. Сизов А.М. Диспергирование расплавов сверхзвуковыми струями. – М.: Металлургия, 1991. – 175 с.
13. Сизов А.Н. Газодинамика и теплообмен газовых струй в металлургических процессах. – М.: Металлургия, 1987. – 256 с.
14. Ибяттов Р.И., Холпанов Л.П., Ахмадиев Ф.Г. Течение многофазной среды по проницаемой поверхности с образованием осадка // Инженерно-физический журнал. 2005. Т. 78. № 2. С. 65 – 72.
15. Смолдырев А.Е. Гидро- и пневмотранспорт в металлургии. – М.: Металлургия, 1985. – 280 с.

Поступила 15 марта 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 12, pp. 857–863.

FORMATION OF THE STRUCTURE OF IRON ORE PELLETS PRODUCED USING HEAT-SPRAYING OF WET CHARGE

V.M. Pavlovets

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. The article describes the possibilities of formation of iron ore pellets structure with regulated distribution of the porosity along the pellets cross section, obtained using heat-spraying of wet charge. With the help of the video and analysis of the macrostructure of sprayed charge layer, which is a matrix for germinal centers, the author gives the description of formation mechanism of the sprayed charge layer and the growth of its geometrical dimensions. The formation of the sprayed charge layer starts with the formation and growth of spraying focus. The formation mechanism of pellets porosity relies on shifting deformation of charge due to existence of friction forces between the air stream and the surface of the sprayed layer. It was found that the heat-spraying of wet charge on the charge skull forms a sprayed layer with an increased proportion of open pores along the cross-section. The value of the open porosity of the sprayed layer depends on the distance to the sprayed surface and the point on surface of the charge skull pelletizer, in which the spraying is organized. The distribution of open and closed pores in the volume of pellets, depending on the mass fraction of the germinal centers, was obtained by the heat-spraying of wet charge.

Keywords: heat-spraying of wet charge, regulated distribution of porosity, variation of porosity, open and closed pores, germs, iron ore pellets.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-857-863

REFERENCES

1. Pavlovets V.M. Principles of the organization of forced nucleation in the cold zone of plate pelletizer. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2009, no. 4, pp. 3–6. (In Russ.).
2. Pavlovets V.M. Moisture-laden pellets production with forced nucleation process. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 6, pp. 15–20. (In Russ.).
3. Pavlovets V.M. Study of the structural characteristics of the charge coating sprayed on the surface of iron materials. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2004, no. 4, pp. 7–12. (In Russ.).
4. Trofimov V.T., Korolev V.A., Voznesenskii E.A., Samarin E.N., Nikolaeva S.K., Shirokov V.N., Ladygin V.M., Sokolov V.N., Komarov I.A., Panas'yan L.L., Bershov A.V., Andreeva T.V. *Laboratory works on the soil science*. Moscow: Vysshaya shkola, 2008, 519 p. (In Russ.).
5. Antsiferov V.N., Bobrov V.G., Druzhinin L.K. *Poroshkovaya metallurgiya i napylennye pokrytiya* [Powder metallurgy and sprayed coatings]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 792 p. (In Russ.).
6. Velikin B.A. *Torokretirovanie metallurgicheskikh pechei* [Spraying of metallurgical furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 280 p. (In Russ.).
7. Dik I.G., Yugov V.I. On modeling of the coated layer structure. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 2005, vol. 78, no. 2, pp. 36–43. (In Russ.).
8. Gavin L.V., Naumov V.A. Turbulent two-phase medium and its numerical study. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 1983, vol. 44, no. 6, pp. 927–932. (In Russ.).
9. Tsirkunov Yu.M. Influence of the viscous boundary layer on the deposition of particles from a gas suspension flowing past a sphere. *Fluid Dynamics*. 1982, vol. 17, no. 1, pp. 48–55.
10. Lozovskii V.A. *Torokretirovanie metallurgicheskikh pechei* [Spraying of metallurgical furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1968, 176 p. (In Russ.).
11. Bobrov V.G., Il'in A.A. *Nanesenie neorganicheskikh pokrytii* [Application of inorganic coatings]. Moscow: Intermet inzhiniring, 2004, 624 p. (In Russ.).
12. Sizov A.M. *Dispergirovanie rasplavov sverkhzvukovymi struyami* [Dispersing of melts by supersonic jets]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 175 p. (In Russ.).
13. Sizov A.N. *Gazodinamika i teploobmen gazovykh strui v metallurgicheskikh protsessakh* [Gas dynamics and heat transfer of gas jets in metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 256 p. (In Russ.).
14. Ibyatov R.I., Kholpanov L.P., Akhmadiev F.G. Flow of a multiphase medium over a permeable surface with formation of sediment. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2005, vol. 78, no. 2, pp. 272–280.
15. Smoldyrev A.E. *Gidro- i pnevmotransport v metallurgii* [Hydro- and pneumatic transport in metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 280 p. (In Russ.).

Information about the author:

V.M. Pavlovets, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Power and Ecology” (pavlovets.victormix@yandex.ru)

Received March 15, 2016

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА ИЗ ФУТЕРОВКИ ПРИ ВЫПЛАВКЕ НИКЕЛЬ-МЕДНЫХ СПЛАВОВ В ВАКУУМНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧАХ*

Титова К.О., инженер кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов (caroline.titova@gmail.com)

Котельников Г.И., к.т.н., доцент кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов (gikotelnikov@yandex.ru)

Зубарев К.А., инженер кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов (st-kirill@mail.ru)

Григорович К.В., д.т.н., профессор кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов (konstantin.grigorovich@gmail.com)

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

Аннотация. В сплавах системы Ni–Cu одной из ограничиваемых примесей в ряде случаев является железо, которое может попадать в металл из шихтовых материалов и футеровки. Содержание Fe_2O_3 в огнеупорах достигает 2,5 %, поэтому оценка прироста концентрации железа в сплавах при взаимодействии металла с футеровкой является актуальной задачей. Целью настоящей работы является оценка влияния содержания Fe_2O_3 в материале тигля, а также вместимости тигля на концентрацию железа в готовом металле. На основе термодинамических расчетов и данных экспериментальных плавок установлено, что никель и медь в сплавах системы Ni–Cu могут восстанавливать железо из материала футеровки. При использовании маложелезистой шихты железо из материала тигля практически полностью переходит в расплав. Проведена оценка прироста содержания железа в никель-медном сплаве в зависимости от вместимости вакуумных индукционных печей и содержания Fe_2O_3 в периклазовых тиглях при условии полного перехода железа из футеровки в металл. С увеличением вместимости печи количество железа, восстановленного из материала тигля, уменьшается, и при массе металла более 200 кг прирост концентрации железа зависит, в основном, не от вместимости печи, а от содержания Fe_2O_3 в футеровке. Показано, что для выплавки сплавов системы Ni–Cu с содержанием железа менее 0,01 % необходимо применять огнеупоры с концентрацией Fe_2O_3 не более 0,5 %. При концентрации железа в сплавах менее 0,05 % рекомендуется выбирать футеровку, в составе которой содержание оксидов железа не превышает 2,5 %.

Ключевые слова: никель-медный сплав, футеровка, восстановление железа, жидкий расплав, термодинамический анализ.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-864-869

Сложнолегированные сплавы ответственного назначения системы Ni–Cu выплавляют в вакуумных индукционных печах (ВИП) [1, 2]. В таких сплавах содержание железа в ряде случаев ограничивают [3, 4]. Например, в сплаве НМ40А верхний предел по содержанию железа составляет 0,05 % (ТУ 48-21-85-85), а в сплаве, используемом для производства компенсационных проводов (МН0,6), концентрация железа не должна превышать 0,01 % (ГОСТ 492–2006). Железо может попадать в металл не только из шихтовых материалов, но и из футеровки печи. Требования к шихтовым материалам обычно четко оговариваются. В то же время вопрос влияния состава футеровки и вместимости тигля на содержание железа в металле при выплавке

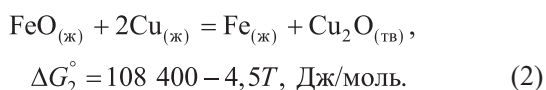
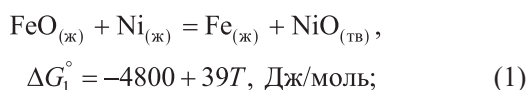
сплавов системы Ni–Cu в литературе практически не освещается [1, 5]; даны лишь некоторые рекомендации относительно содержания оксидов железа (< 0,1 %) в составе футеровочных смесей [6]. Однако чистые по содержанию оксида Fe_2O_3 огнеупоры имеют более высокую стоимость (в 1,5 – 2 раза дороже) [7] и довольно дефицитны. В связи с этим представляется актуальной оценка влияния концентрации Fe_2O_3 в футеровке, а также вместимости тигля на содержание железа в сплавах системы Ni–Cu. Такая оценка целесообразна в силу того, что материалы для изготовления тиглей содержат от 0,3 % Fe_2O_3 в сером корунде до 2,5 % Fe_2O_3 в плавном периклазе [8].

Восстановление оксидов железа при взаимодействии контактного слоя футеровки с жидким металлом в ходе расплавления в принципе может проходить за счет никеля и меди. Отметим, что эти металлы имеют меньшее стандартное сродство к кислороду, нежели железо [9]. При температуре 1550 °С стандартные энергии образования Гиббса соответствующих оксидов из

* Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы». Проект №14.578.21.0023 «Разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий производства сложнолегированных марок сталей и сплавов с заданными свойствами для деталей и узлов авиакосмической техники». Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57814X0023.

чистых компонентов равны: $\Delta G_{\text{FeO}}^{\circ} = -151\,031$ Дж/моль; $\Delta G_{\text{NiO}}^{\circ} = -86\,684$ Дж/моль; $\Delta G_{\text{Cu}_2\text{O}}^{\circ} = -50\,609$ Дж/моль. Это означает, что в соответствии с приведенными значениями ΔG° восстановление железа за счет никеля и меди представляется маловероятным. В то же время активность образующихся продуктов реакции восстановления оксидов железа будет низкой, что может повысить вероятность протекания этого процесса.

Термодинамические расчеты показывают, что при температуре 1500 °С оксид железа Fe_2O_3 на 95 % превращается в оксид FeO . Следовательно, анализ процесса восстановления оксидов железа никелем и медью необходимо вести, используя уравнения реакций:



Величины ΔG_1° и ΔG_2° получены методом комбинирования стандартных энергий Гиббса реакций образования FeO , NiO и Cu_2O [9]. Температурные зависимости констант равновесия реакций (1) и (2) описываются уравнениями

$$\ln K_1 = \frac{577}{T} - 4,69; \quad (3)$$

$$\ln K_2 = \frac{13\,038}{T} + 0,54. \quad (4)$$

Дальнейший анализ проводили для базовой температуры плавки 1500 °С. При этой температуре $K_1 = 0,0127$, $K_2 = 0,0011$. Отметим, что величина константы равновесия реакции (2) восстановления железа медью на порядок ниже, нежели значение константы равновесия реакции (1).

Допустим, что в процессе взаимодействия жидкого металла с футеровкой концентрация оксидов железа в слое тигля, следующем за контактным, остается неизменной. Это допущение соответствует условию, что металл реагирует с футеровкой послойно. Допустим также, что мольная доля образующегося оксида NiO равна исходной мольной доле оксида FeO в огнеупорном материале. То же допущение применимо и в отношении оксида меди Cu_2O .

Выражения констант равновесия реакций (1) и (2) имеют следующий вид (через мольные доли оксидов и коэффициенты активности соответствующих элементов):

$$K_1 = \frac{x_{\text{Fe}} \gamma_{\text{Fe}} x_{\text{NiO}} \gamma_{\text{NiO}}}{x_{\text{Ni}} \gamma_{\text{Ni}} x_{\text{FeO}} \gamma_{\text{FeO}}}; \quad (5)$$

$$K_2 = \frac{x_{\text{Fe}} \gamma_{\text{Fe}} x_{\text{Cu}_2\text{O}} \gamma_{\text{Cu}_2\text{O}}}{x_{\text{Cu}} \gamma_{\text{Cu}} x_{\text{FeO}} \gamma_{\text{FeO}}}, \quad (6)$$

где x и γ – мольные доли и коэффициенты активности компонентов металлического и оксидного растворов.

Примем, что поведение компонентов металлического и оксидного растворов отвечает модели совершенных растворов, т. е. соответствующие коэффициенты активности γ_{Fe} , γ_{FeO} , γ_{Ni} , γ_{NiO} , γ_{Cu} , $\gamma_{\text{Cu}_2\text{O}}$ равны единице. В соответствии со сделанными выше допущениями мольные доли оксидов железа и никеля равны: $x_{\text{FeO}} = x_{\text{NiO}}$. То же равенство будем считать справедливым и для мольных долей оксидов железа и меди: $x_{\text{FeO}} = x_{\text{Cu}_2\text{O}}$. Тогда для условий плавки чистого никеля ($x_{\text{Ni}} = 1$) равновесная мольная доля железа в жидком металле составит $x_{\text{Fe}} = K_1 = 0,0127$; в случае плавки жидкой меди ($x_{\text{Cu}} = 1$) равновесная мольная доля железа равна константе равновесия реакции (2): $x_{\text{Fe}} = K_2 = 0,0011$. Пересчет мольных долей x_{Fe} на содержание железа в массовых процентах дает 1,2 и 0,1 % Fe при плавке чистых никеля и меди соответственно. То есть медь является более слабым восстановителем для оксидов железа в сравнении с никелем.

В таблице представлены результаты расчетов равновесной концентрации железа, восстановленного из футеровки, в зависимости от содержания никеля и меди в сплаве.

Для ВИП вместимостью от 4 до 3000 кг удельный расход футеровки, взаимодействующей с металлом, не превышает 9 г/кг. Тогда при содержании в материале тигля 2,5 % Fe_2O_3 и полном переходе железа из футеровки в металл максимальный прирост его содержания в расплаве составит 0,016 %. При использовании чистых по железу шихтовых материалов концентрация железа в шихте не превышает 0,010 %, т. е. общее максимальное содержание железа $[\text{Fe}]_{\text{с}}$ в металлической ванне составит порядка 0,025 – 0,030 %. Сравнение этих значений с равновесной концентрацией железа (см. таблицу) показывает, что во всем интервале концентраций никеля и меди в сплавах системы Ni-Cu содержание $[\text{Fe}]_{\text{равн}}$ су-

Равновесная концентрация железа в сплавах системы Ni–Cu

Equilibrium concentration of iron in the Ni–Cu alloys

Состав сплава, %		Концентрация железа в сплаве, %	
Ni	Cu	в равновесии с [Ni]	в равновесии с [Cu]
0	100	0	0,100
1	99	0,0116	0,098
10	90	0,1156	0,081
20	80	0,2310	0,064
40	60	0,4620	0,036
60	40	0,6940	0,016
80	20	0,9250	0,004
90	10	1,0400	0,001
100	0	1,1560	0

щественно превышает $[\text{Fe}]_{\Sigma}$. Это означает, что восстановление оксидов железа из футеровки в этом случае термодинамически возможно.

Выполнены уточненные термодинамические расчеты с использованием компьютерной программы [10], в которой определение активности компонентов металлического раствора проводится по параметрам взаимодействия в никеле [11 – 13]. Наряду с расчетом равновесия при взаимодействии металла и футеровки в программе одновременно учитывается баланс масс компонентов. Компьютерный расчет для сплава Ni–Cu дает практически те же результаты (0,0158 % Fe во всем интервале концентраций никеля), что и оценка концентрации железа в сплаве при условии его полного перехода из материала тигля (0,016 % Fe).

Для проверки изложенных выше представлений о взаимодействии контактного слоя тигля с жидким металлом и переходе железа из футеровки в расплав необходимо оценить возможность восстановления железа из футеровочных материалов с низким (до 0,3 %) содержанием Fe_2O_3 . Такими материалами являются высокоглиноземистые огнеупоры, в частности корунд [14].

Равновесное распределение железа между корундовым тиглем и жидким никель-медным расплавом (38 % Cu; 0,00162 % Fe) рассчитывали с помощью компьютерной программы [10]. Моделировали выплавку сплава массой 250 г в корундовом тигле (0,023 % Fe_2O_3) при температуре 1500 °C в интервале давлений $10^2 - 10^5$ Па (0,001 – 1,0 атм). Расход материала тигля, прореагировавшего с жидким металлом, принят равным 14 г/кг (методика оценки изложена ниже: формулы (7) – (14)). Равновесный расчет показывает, что и в этом случае содержание Fe_2O_3 в футеровке в результате взаимодействия с жидким металлом должно снизиться почти до нуля. Концентрация железа в расплаве повышается от 0,00162 до 0,00185 %; это отвечает практически полному восстановлению оксидов железа из футеровки даже при пониженном их содержании в огнеупорном материале.

Результаты расчетов взаимодействия никель-медного расплава с корундовой футеровкой проверены экспериментально. В печи сопротивления Таммана с корундовым тиглем при давлении 1 Па и температуре 1450 – 1500 °C провели четыре плавки никель-медного сплава с 38 % Cu; масса металла в среднем равнялась 250 г. Концентрация железа в шихте составляла 0,00162 %. Методом рентгено-флуоресцентного анализа установлено, что в материале тигля содержится 0,023 % Fe_2O_3 . Содержание железа в полученных образцах сплава определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) [15].

На рис. 1 представлены экспериментальные данные по содержанию железа в никель-медном сплаве и результаты равновесного расчета взаимодействия жидкого расплава с контактным слоем корундового тигля с

0,023 % Fe_2O_3 . Видно, что экспериментальные данные достаточно близки к равновесным. Это означает, что железо может переходить из футеровки в расплав практически полностью. Точку с 0,0030 % Fe в сплаве можно объяснить тем, что на данной плавке наблюдались значительное кипение металла и повышенный расход материала тигля.

Для плавки представляет интерес оценить, как будет изменяться концентрация железа в металле в зависимости от вместимости печи и начального содержания оксидов железа в футеровке при условии их полного восстановления из огнеупорных материалов.

Восстановление оксидов железа происходит из слоя тигля, находящегося в непосредственном контакте с жидким металлом. Из опыта эксплуатации вакуумных индукционных печей известно [6, 16], что замену тигля проводят, когда его износ достигает 25 – 30 % от общей его толщины. Примем, что масса израсходованной футеровки при этом также составляет 25 – 30 % от массы тигля.

Оценим общую массу футеровки:

$$m_{\text{фут}} = V_{\text{фут}} \rho_{\text{фут}}; \quad (7)$$

здесь $V_{\text{фут}}$ – объем тигля; $\rho_{\text{фут}}$ – кажущаяся плотность материала тигля (для периклаза $\rho_{\text{фут}} = 3450$ кг/м³, для корунда – 3800 кг/м³ [17]).

Условно примем, что тигель имеет форму цилиндра с внутренним диаметром D_m и толщиной стенок и дна $\delta_{\text{фут}}$. Тогда объем футеровки $V_{\text{фут}}$ при высоте металла h_m составит

$$V_{\text{фут}} = \pi D_m \delta \left(\frac{D_m}{4} + h_m \right). \quad (8)$$

Значения D_m , h_m и $\delta_{\text{фут}}$ рассчитывали согласно рекомендациям работ [18, 19]:

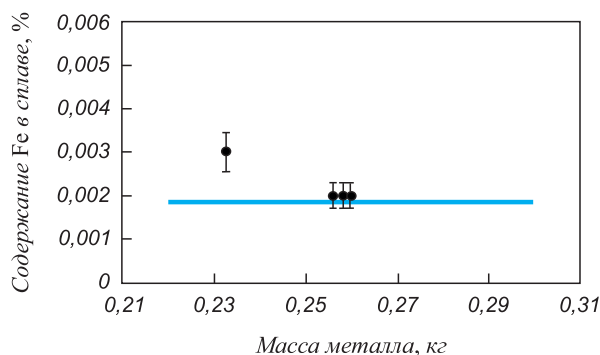


Рис. 1. Конечная концентрация железа в никель-медном сплаве (38 % Cu) при взаимодействии жидкого металла с корундовым тиглем. Прямая линия отвечает равновесному расчету, точки – экспериментальные данные

Fig. 1. Final concentration of iron in the Ni–Cu alloy (38 % Cu) in liquid metal after reacting with the corundum crucible. The straight line corresponds to the equilibrium calculation, the points – to the experimental data

$$D_m = \sqrt[3]{\frac{4m}{\pi \rho_{ж.м} (1,54 - 0,006m^{0,35})}}; \quad (9)$$

$$h_m = \sqrt[3]{\frac{4m(1,54 - 0,006m^{0,35})^2}{\pi \rho_{ж.м}}}; \quad (10)$$

$$\delta_{фут} = 0,087m^{0,175}, \quad (11)$$

где $\rho_{ж.м} = 7900 \text{ кг/м}^3$ – плотность жидкого никель-медного сплава; m – вместимость печи, т.

Удельный расход футеровки определен на основе следующих допущений. Среднее количество плавов за кампанию до замены тигля составит 30 [6]. Тогда удельный расход футеровки (г/кг металла) будет равен

$$m_{фут}^{уд} = \frac{m_{фут}}{30m}. \quad (12)$$

Удельный расход футеровки, взаимодействующей с жидким расплавом, составляет 25 – 30 % от общего расхода: $m_{конт.фут}^{уд} = (0,25 - 0,30)m_{фут}^{уд}$.

Удельная масса оксида железа, содержащегося в контактном слое футеровки, определится как

$$m_{Fe_2O_3}^{уд} = \frac{m_{конт.фут}^{уд} (\% Fe_2O_3)}{100 \%}. \quad (13)$$

При полном восстановлении оксида Fe_2O_3 из контактного слоя и переходе железа в расплав концентрация его возрастет на

$$\Delta[\% Fe]_{фут} = m_{Fe_2O_3}^{уд} \frac{2 \cdot 56}{2 \cdot 56 + 3 \cdot 16} \cdot 0,1, \quad (14)$$

где 56 и 16 – атомные массы железа и кислорода.

На рис. 2 представлена зависимость удельного расхода периклазовой футеровки тигля ВИП и отдельно

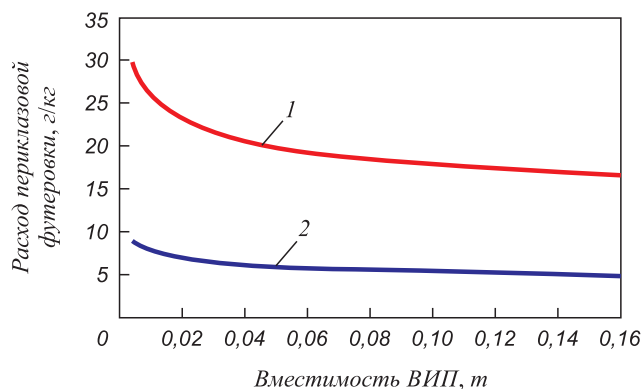


Рис. 2. Зависимость удельного расхода периклазовой футеровки вакуумной индукционной печи от вместимости ВИП: 1 – общий удельный расход; 2 – расход контактного слоя футеровки

Fig. 2. Specific consumption of the periclase lining in a vacuum induction furnace depending on the VIF capacity: 1 – total specific consumption; 2 – consumption of reacting refractory layer

контактного слоя, взаимодействующего с жидким расплавом, от вместимости печи. Видно, что с повышением вместимости ВИП расход футеровки сначала достаточно резко снижается, а затем, начиная со 100 – 150 кг, меняется незначительно.

На рис. 3 показан прирост концентрации железа в никель-медном сплаве в зависимости от вместимости вакуумной индукционной печи и содержания Fe_2O_3 в периклазовом тигле при условии полного восстановления железа из футеровки. Видно, что относительно высокий прирост содержания железа от периклазовой футеровки наблюдается только при плавке металла в тиглях малой вместимости. При массе металла более 200 кг увеличение концентрации железа зависит, в основном, не от вместимости, а от содержания Fe_2O_3 в материале тигля.

Зависимость суммарного содержания железа в никель-медном сплаве от вместимости печи и концентрации Fe_2O_3 в периклазовом тигле при условии, что железо полностью переходит из футеровки в металл, представлена на рис. 4. Содержание железа в металле складывается из концентрации железа в шихте (принято 0,00162 % Fe для плавки на чистой шихте: никель марки Н0 и медь марки М00к) и железа, восстановленного из материала тигля.

Из рис. 4 видно, что в области малых значений вместимости ВИП общее содержание железа в сплаве существенно возрастает за счет восстановления оксида Fe_2O_3 из периклазовой футеровки. В связи с этим при выплавке сплавов системы Ni–Cu с пониженным содержанием железа (менее 0,01 %) целесообразно выбирать материал тигля таким образом, чтобы концентрация оксидов железа в нем не превышала 0,5 % вне

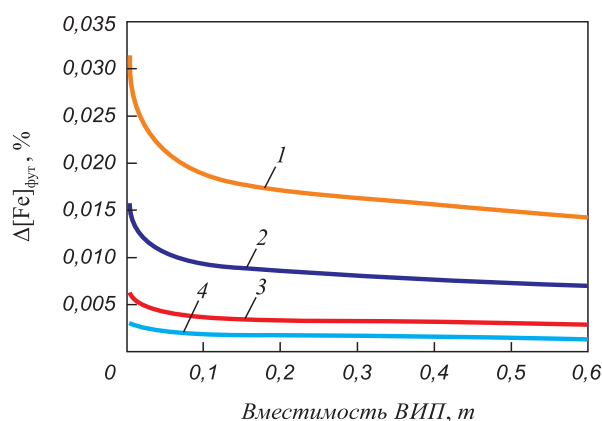


Рис. 3. Прирост содержания железа в никель-медном сплаве в зависимости от вместимости ВИП и содержания Fe_2O_3 в периклазовом тигле при условии полного перехода железа из футеровки в металл; кривые отвечают различному содержанию Fe_2O_3 в материале тигля: 1 – 5 %; 2 – 2,5 %; 3 – 1,0 %; 4 – 0,5 %

Fig. 3. Iron growth in the nickel-copper alloy depending on the VIF capacity and Fe_2O_3 content in a periclase crucible with the full transfer of iron from the lining into the metal; curves correspond to different Fe_2O_3 content in the crucible material: 1 – 5 %; 2 – 2.5 %; 3 – 1.0 %; 4 – 0.5 %

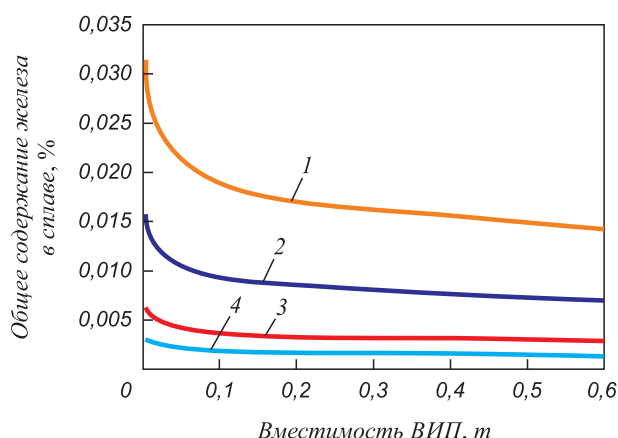


Рис. 4. Общее содержание железа в никель-медном сплаве в зависимости от вместимости ВИП и концентрации Fe_2O_3 в периклазовом тигле при условии полного перехода железа из футеровки в металл; кривые отвечают различной концентрации Fe_2O_3 в материале тигля: 1 — 5 %; 2 — 2,5 %; 3 — 1,0 %; 4 — 0,5 %

Fig. 4. The total iron content in the nickel-copper alloy according to the VIF capacity and Fe_2O_3 concentration in the periclase crucible with the full transfer of iron from the lining into the metal; curves correspond to different concentrations of Fe_2O_3 in the crucible material: 1 — 5 %; 2 — 2,5 %; 3 — 1,0 %; 4 — 0,5 %

зависимости от вместимости печи. При производстве никель-медных сплавов с концентрацией железа не более 0,05 % можно использовать футеровку с повышенным содержанием оксида Fe_2O_3 (вплоть до 2,5 % и даже 5 %).

Выводы. Термодинамический анализ процессов плавки никель-медных сплавов показывает, что оксиды железа, содержащиеся в материале тигля, могут восстанавливаться практически полностью при любой концентрации никеля и меди в системе Ni–Cu. Экспериментальные плавки подтверждают этот вывод. Проведена оценка возможного прироста содержания железа в никель-медных сплавах в зависимости от вместимости ВИП и содержания оксида Fe_2O_3 в периклазовых тиглях при условии полного перехода железа из футеровки в металл. Показано, что с увеличением вместимости печи количество железа, восстановленного из материала тигля, снижается, и при массе металла более 200 кг прирост концентрации железа зависит, в основном, не от вместимости печи, а от содержания Fe_2O_3 в футеровке. При выплавке сплавов системы Ni–Cu с пониженным содержанием железа (менее 0,01 %) целесообразно выбирать материал тигля с концентрацией Fe_2O_3 не более 0,5 % вне зависимости от вместимости ВИП. В сплавах с концентрацией железа менее 0,05 % рекомендуется выбирать футеровку, в составе которой содержание оксидов железа не превышает 2,5 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Производство отливок из сплавов цветных металлов / А.В. Курдюмов, В.Д. Белов, М.В. Пикунов и др. — М.: ИД МИСиС, 2011. — 615 с.
2. Металловедение. Учебник. В 2-х томах. Т. II. / И.И. Новиков, В.С. Золоторевский, К.К. Портной и др. — М.: ИД МИСиС, 2009. — 528 с.
3. Медь. Латунь. Бронза: Учебное пособие для вузов. Сост.: Г.В. Ашихмин, В.П. Полухин. Под общей ред. Ю.Н. Райкова. — М.: ОАО «Институт Цветметобработка», 2006. — 584 с.
4. Смирягин А.П., Смирягина А.Н., Белова А.В. Промышленные цветные металлы и сплавы. — М.: Металлургия, 1974. — 488 с.
5. Пикунов М.В. Плавка металлов, кристаллизация сплавов, затвердевание отливок. — М.: ИД МИСиС, 2005. — 416 с.
6. Сасса В.С. Футеровка индукционных электропечей. — М.: Металлургия, 1989. — 232 с.
7. Строительный интернет-портал. <http://www.stroyvitrina.ru>.
8. Официальный сайт компании «Группа Магnezит». <http://www.magnezit.ru>.
9. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. — М.: Металлургия, 1987. — 272 с.
10. Теория и технология металлургии стали: технологические расчеты на базе равновесного распределения компонентов в системе металл–шлак–газ с использованием компьютерной программы «ГИББС-МИСиС»: Учеб. пособие. / Г.И. Котельников, А.Е. Семин, А.А. Толстоуцкий и др. — М.: ИД МИСиС, 2011. — 54 с.
11. Белянчиков Л.Н. Оценка параметров взаимодействия элементов в расплавах на основе никеля // Электрометаллургия. 2006. № 8. С. 29 — 37.
12. Белянчиков Л.Н. Универсальная методика пересчета значений параметров взаимодействия элементов с одной основы сплава на другую на базе теории квазирегулярных растворов. Ч. I. Теоретические основы и адекватность модели пересчета // Электрометаллургия. 2009. № 1. С. 23 — 29.
13. Белянчиков Л.Н. Универсальная методика пересчета значений параметров взаимодействия элементов с одной основы сплава на другую на базе теории квазирегулярных растворов. Ч. II. Оценка параметров взаимодействия элементов в никелевых сплавах // Электрометаллургия. 2009. № 2. С. 29 — 38.
14. Огнеупорные материалы. Структура, свойства, испытания: Справочник, пер. с нем./ Й. Алленштейн и др.; под ред. Г. Роучка, Х. Вутнау. — М.: Интермет Инжиниринг, 2010. — 392 с.
15. Карпов Ю.А., Савостин А.П., Сальников В.Д. Аналитический контроль в металлургическом производстве: Учеб. пособие. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. — 352 с.
16. Каблуковский А.Ф., Молчанов О.Е., Каблуковская М.А. Краткий справочник электросталевара: Справ. изд.: — М.: Металлургия, 1994. — 352 с.
17. Сайт о вакуумной технике. <http://www.pro-vacuum.ru>.
18. Егоров А.В. Расчет мощности и параметров электропечей черной металлургии. Учеб. пособие для вузов. — М.: Металлургия, 1990. — 280 с.
19. Электротермическое оборудование: Справочник / Под общей ред. А.П. Альтгаузена. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1980. — 416 с.

Поступила 10 октября 2016 г.

ANALYSIS OF IRON REDUCTION FROM THE LINING AT VACUUM SMELTING OF THE Ni–Cu ALLOYS

K.O. Titova, G.I. Kotel'nikov, K.A. Zubarev, K.V. Grigorovich

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

Abstract. Iron is one of the impurities limited in the Ni–Cu alloys. It may enter into the metal from charge materials and the lining. The content of Fe_2O_3 in the refractory may reach 2.5 % therefore the estimation of iron concentration growth in the alloys during the interaction of the metal and the lining is the important issue. The aim of this work was to estimate the influence of Fe_2O_3 content in the crucible material and capacity on the concentration of iron in finished metal. Using the thermodynamic calculations and the experimental data it was determined that nickel and copper may reduce iron from the refractory in the Ni–Cu alloys. Thus, iron turns from the crucible material to the melt almost completely if low-iron charge is used for smelting. The assessment of iron content growth in the Ni–Cu alloys was provided depending on the VIF capacity and Fe_2O_3 content in periclase crucibles upon condition of the complete transfer of iron into the metal from the lining. The concentration of reduced iron decreases with the increasing of the furnace capacity, and when the mass of the metal is over 200 kg, the growth of the concentration of iron depends not on the capacity but on Fe_2O_3 content in the refractory. It was shown that the refractory with Fe_2O_3 concentration not exceeding 0.5 % is necessary to use for the Ni–Cu alloys production with less 0.01 % of iron. The crucibles with Fe_2O_3 content not exceeding 2.5 % are recommended for melting of the Ni–Cu alloys with less 0.05 % of iron.

Keywords: nickel-copper alloy, lining, iron reduction, liquid smelt, thermodynamic analysis.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-864-869

REFERENCES

1. Kurdyumov A.V., Belov V.D., Pikunov M.V. etc. *Proizvodstvo otlivok iz splavov tsvetnykh metallov* [Production of castings of non-ferrous metals and alloys]. Moscow: ID MISiS, 2011, 615 p. (In Russ.).
2. Novikov I.I., Zolotarevskii V.S., Portnoi K.K. etc. *Metallovedenie: uchebnyk v 2-kh tomakh. T. II.* [Metal science. Textbook in 2 vols. Vol. II]. Moscow: ID MISiS, 2009, 528 p. (In Russ.).
3. Ashikhmin G.V., Polukhin V.P. *Med'. Latun'. Bronza: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Copper. Brass. Bronze. Textbook for universities]. Raikov Yu.N. ed. Moscow: OAO "Institut Tsvetmetobrabotka", 2006, 584 p. (In Russ.).
4. Smiryagin A.P., Smiryagina A.N., Belova A.V. *Promyshlennyye tsvetnye metally i splavy* [Industrial non-ferrous metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1974, 488 p. (In Russ.).
5. Pikunov M.V. *Plavka metallov, kristallizatsiya splavov, zatverdevanie otlivok* [Metal smelting, alloys crystallization, solidification of castings]. Moscow: MISiS, 2005, 416 p. (In Russ.).
6. Sassa V.S. *Futerovka induktsionnykh elektropechei* [Lining of induction furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 232 p. (In Russ.).
7. *Stroitel'nyi internet-portal* [Building website]. Available at URL: www.stroyvitrina.ru (In Russ.).
8. *Ofitsial'nyi sait kompanii "Gruppa Magnezit"* [Official website of Magnezit Group]. Available at URL: www.magnezit.ru (In Russ.).
9. Grigoryan V.A., Belyanchikov L.N., Stomakhin A.Ya. *Teoreticheskie osnovy elektrostaleplavil'nykh protsessov* [Theoretical foundations of EAF processes]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 272 p. (In Russ.).
10. Kotel'nikov G.I., Semin A.E., Tolstolutsii A.A. etc. *Teoriya i tekhnologiya metallurgii stali: tekhnologicheskie raschety na baze ravnovesnogo raspredeleniya komponentov v sisteme metall-shlak-gaz s ispol'zovaniem komp'yuternoi programmy "GIBBS-MISiS": ucheb. posobie* [Theory and technology of steel metallurgy: technological calculations based on equilibrium distribution of components in the system "metal-slag-gas" using computer program "GIBBS-MISiS". Manual]. Moscow: ID MISiS, 2011, 54 p. (In Russ.).
11. Belyanchikov L.N. Estimation of the interaction parameters in nickel-based melts. *Elektrometallurgiya*. 2006, no. 8, pp. 29–37. (In Russ.).
12. Belyanchikov L.N. The universal method of recalculating the values of the interaction parameters from one alloy base to another using the quasi-regular solutions theory. Part I. Theoretical basis and adequacy of the recalculation model. *Elektrometallurgiya*. 2009, no. 1, pp. 23–29. (In Russ.).
13. Belyanchikov L.N. The universal method of recalculating the values of the interaction parameters from one alloy base to another using the quasi-regular solutions theory. Part II. Estimation of the interaction parameters in nickel alloys. *Elektrometallurgiya*. 2009, no. 2, pp. 29–38. (In Russ.).
14. Allenstein Jochen u. a. *Feuerfeste Werkstoffe. Aufbau. Eigenschaften. Prüfung*. Routschka G., Wuthnow H. Hrsg. Essen, Auflage Vulkan Verlag. 2007. (Russ.ed.: Allenstein J. Ogneupornye materialy. Struktura, svoystva, ispytaniya: spravochnik. Routschka G., Wuthnow H. eds. Moscow: Internet Inzhiniring, 2010, 392 p.).
15. Karpov Yu.A., Savostin A.P., Sal'nikov V.D. *Analiticheskii kontrol' v metallurgicheskoy proizvodstve: ucheb. posobie* [Analytical control in metallurgical production: Textbook]. Moscow: IKTs "Akademkniga", 2006, 352 p. (In Russ.).
16. Kablukovskii A.F., Molchanov O.E., Kablukovskaya M.A. *Kratkii spravochnik elektrostalevara: sprav. izd.* [Short reference book for electric steelmaker]. Moscow: Metallurgiya, 1994, 352 p. (In Russ.).
17. *Sait o vakuumnoi tekhnike* [Website of vacuum technology]. Available at URL: www.pro-vacuum.ru (In Russ.).
18. Egorov A.V. *Raschet moshchnosti i parametrov elektropechei chernoi metallurgii. ucheb. posobie dlya vuzov* [Calculation of electric power and parameters of electric furnaces in steel industry. Textbook]. Moscow: Metallurgiya, 1990, 280 p. (In Russ.).
19. *Elektrotermicheskoye oborudovanie: spravochnik* [Thermal-electric equipment: Reference book]. Al'tgauzen A.P. ed. Moscow: Energiya, 1980, 416 p. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was performed within the framework of the Federal Target Program "Research and development of priority directions of scientific-technological complex of Russia for 2014 – 2020". Project no. 14.578.21.0023 "Development and introduction of resource-saving production technologies of complexly alloyed steels and alloys with desired properties for components and parts of aerospace techniques". The unique identifier of the agreement is RFMEFI57814X0023.

Information about the authors:

K.O. Titova, Engineer (caroline.titova@gmail.com)G.I. Kotel'nikov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection (gikotelnikov@yandex.ru)K.A. Zubarev, Engineer (st-kirill@mail.ru)K.V. Grigorovich, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection, Head of the Laboratory (konstantin.grigorovich@gmail.com)

Received October 10, 2016

РАСЧЕТ СИЛ И МОМЕНТОВ СЕМИРОЛИКОВОЙ ПРАВИЛЬНОЙ МАШИНЫ ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПРАВКЕ СТАЛЬНОГО ЛИСТА

Шинкин В.Н., д.ф.-м.н., профессор кафедры физики (shinkin-korolev@yandex.ru)

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

Аннотация. Предложен математический метод определения сил и моментов при предварительной холодной правке толстого стального листа на семироликовой листопрямильной машине. Расчеты позволяют определить реакции опор рабочих роликов, остаточные напряжения в стенке стального листа, долю пластической деформации по толщине листа и относительную деформацию продольных поверхностных волокон листа при правке в зависимости от радиуса рабочих роликов, шага между роликами листопрямильной машины, величины обжатия листа верхними роликами, толщины листа, а также модуля Юнга, предела текучести и модуля упрочнения металла листа. Результаты исследований могут быть использованы на металлургических и машиностроительных заводах.

Ключевые слова: стальной лист, многороликовые листопрямильные машины, упругопластическая среда с линейным упрочнением.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-870-874

Прокатные станы и многороликовые правильные машины широко используются при производстве стального листа в российской и зарубежной металлургической промышленности [1 – 16].

Ранее была предложена методика определения геометрической формы и кривизны ϵ (радиуса кривизны ρ) стального листа при правке на семироликовой правильной машине. Поэтому далее будем считать, что при правке листа его кривизна, радиус кривизны, углы и координаты точек касания листа с роликами уже известны.

В настоящей работе подробно рассмотрим метод определения изгибающих моментов и остаточных напряжений, а также реакций опор рабочих роликов в семироликовой правильной машине.

Вычисление энергосиловых параметров многороликовых листопрямильных машин является важным технологическим расчетом при правке стального листа. В основу энергосилового расчета входит вычисление изгибающих моментов стального листа при правке и суммарной реакции опор рабочих роликов (усилий верхней и нижней кассет роликов) правильной машины.

При недостаточном изгибающем моменте стального листа невозможно устранить вредные остаточные напряжения в его стенке и поверхностные дефекты. Если недостаточно усилие верхней кассеты роликов, то невозможно достигнуть требуемого обжатия листа для качественной правки.

Чрезмерные значения крутящих моментов роликов и усилий кассет роликов часто приводят к дефектам листа, поломке рабочих и опорных роликов и поломке всей листопрямильной машины.

Отметим, что оценка силовых параметров при различных методах изгиба и формовки листа в металлургии рассматривалась в работах [10 – 16].

Изгибающие моменты при правке стального листа. Пусть H_i ($i = 1, \dots, 7$) – обжатия листа рабочими роликами. Не ограничивая общности, далее будем считать, что нижние четыре рабочих ролика неподвижны ($H_1 = H_3 = H_5 = H_7 = 0$ мм), а верхние три рабочих ролика имеют независимые вертикальные перемещения.

Пусть Π_p и Π_c – модули упрочнения стали при растяжении и сжатии; E и σ_t – модуль Юнга и предел текучести; R – радиус рабочих роликов; ϕ_i – углы точек касания роликов и стального листа ($i = 1, \dots, 7$); t – шаг рабочих роликов; $R_0 = R + h/2$; $\epsilon_i = 1/\rho_i$ и ρ_i – кривизна листа в точках касания с роликами и радиусы кривизны; h – толщина листа.

При упругом изгибе ($\rho \geq \rho_t = hE/(2\sigma_t)$) коэффициент пружинения стального листа будет $\beta(\rho) = \infty$. При пластическом изгибе ($\rho < \rho_t = hE/(2\sigma_t)$) коэффициент пружинения стального листа определяется из соотношения

$$\beta(\rho) = \frac{1}{\left(1 - \frac{\Pi_p + \Pi_c}{2E}\right) \left(1 - 2 \frac{\rho \sigma_t}{hE}\right)^2 \left(1 + \frac{\rho \sigma_t}{hE}\right)}.$$

При пластическом изгибе стального листа изгибающий момент равен [10 – 12]

$$M(\rho) = \frac{bh^2 \sigma_t}{12} \left[3 - 4 \left(\frac{\sigma_t \rho}{hE} \right)^2 \right] + \frac{bh^3 (\Pi_p + \Pi_c)}{24\rho} \times \left(1 - 2 \frac{\sigma_t \rho}{hE} \right)^2 \left(1 + \frac{\sigma_t \rho}{hE} \right),$$

где b – ширина листа.

Для высокопрочных сталей модули упругости при растяжении и сжатии практически равны друг другу: $\Pi_c \approx \Pi_p = \Pi$.

При упругом изгибе стального листа изгибающий момент равен

$$M(\rho) = \frac{bh^3E}{12\rho}.$$

Пусть M_i – изгибающие моменты стального листа в точках касания рабочих роликов с листом:

$$M_1 = 0, M_2 = M(\rho_2), M_3 = -M(\rho_3), M_4 = M(\rho_4),$$

$$M_5 = -M(\rho_5), M_6 = M(\rho_6), M_7 = 0.$$

Изгибающие моменты листа в точках касания листа с роликами при $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $R = 125$ мм, $\sigma_T = 5 \cdot 10^8$ Па, $h = 10$ мм, $t = 270$ мм, $\rho_1 = -1$ м, $H_2 = 12$ мм, $H_4 = 6$ мм и $H_6 = 1$ мм показаны на рис. 1.

Экстремальные остаточные напряжения составят

$$\sigma_{ост}^1 = \sigma_T + \Pi(\varepsilon_{max} - \varepsilon_T) - 6\left(\frac{M}{bh^2}\right);$$

$$\sigma_{ост}^2 = \sigma_T - 12\left(\frac{M}{bh^2}\right)\frac{\sigma_T\rho}{Eh},$$

где $\varepsilon_T = E/\sigma_T$.

Расстояние от нейтральной линии до зоны пластичности (граница между упругой и пластической зонами) в поперечном сечении листа равно $y_T = \sigma_T\rho/E$.

Доля пластической деформации по толщине листа при правке. Доля пластической деформации по толщине листа равна

$$\eta = \begin{cases} 1 - \frac{2\sigma_T\rho}{Eh}, & \text{если } \rho \leq \frac{Eh}{2\sigma_T}; \\ 0, & \text{если } \rho > \frac{Eh}{2\sigma_T}. \end{cases}$$

Относительная деформация продольных поверхностных волокон листа определится как

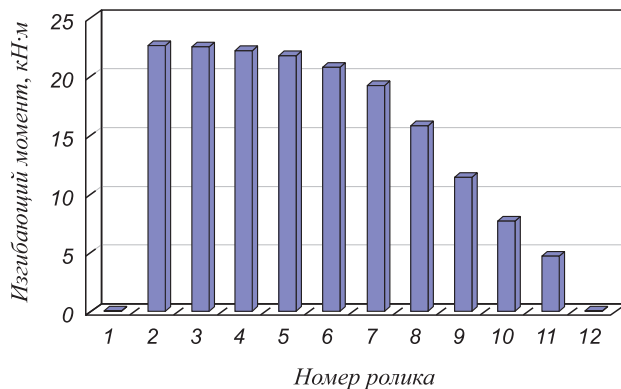


Рис. 1. Изгибающие моменты листа в точках контакта с роликами

Fig. 1. Bending moments of the sheet at contact points with rollers

$$\eta_{прв} = \frac{h}{2|\rho|}.$$

Численные расчеты доли пластической деформации по толщине листа и относительной деформации продольных поверхностных волокон листа в семироликовой листопрямительной машине при $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $R = 0,125$ м, $\sigma_T = 5 \cdot 10^8$ Па, $h = 10$ мм, $t = 270$ мм, $\rho_1 = -1$ м, $H_2 = 12$ мм, $H_4 = 6$ мм и $H_6 = 1$ мм показаны на рис. 2, а, б.

Вычисление силовых параметров семироликовой правильной машины. Пусть N_i , M_{pi} и F_{pi} ($F_{pi} = M_{pi}/R$) – соответственно реакция опоры, вращательный момент (передаваемый от редуктора) и подающее усилие i -го ролика ($i = 1, \dots, 7$) (рис. 3).

Построим семь систем координат $y-z$ в точках касания листа с роликами. Оси y направим по радиусу роликов к их центру, а оси z – по касательной к поверхности роликов слева направо.

Пусть y_{ji} и z_{ji} – координаты точек касания листа с j -ым роликом в i -ой системе координат, а $\Delta y_{(i+1)i}$ и $\Delta z_{(i+1)i}$ – расстояния по вертикали и горизонтали между соседними точками касания листа с роликами.

Тогда введенные вспомогательные расстояния составят:

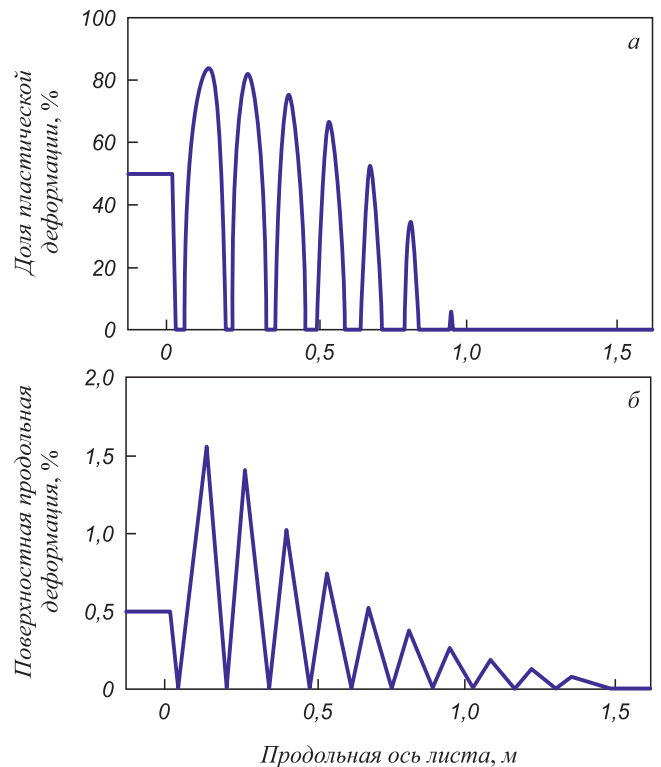


Рис. 2. Доля пластической деформации по толщине листа (а) и относительная деформация продольных поверхностных волокон листа (б)

Fig. 2. The proportion of plastic deformation on the sheet thickness (a) and the relative deformation of longitudinal surface fibers of the sheet (b)

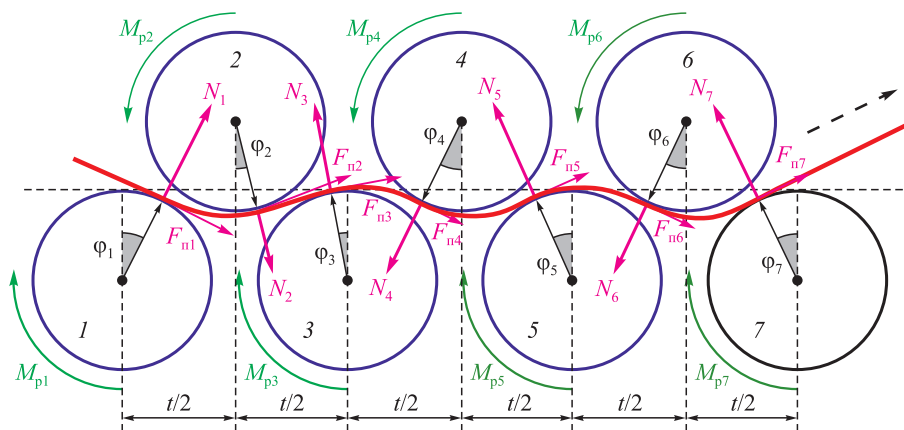


Рис. 3. Силы и моменты, действующие на стальной лист

Fig. 3. Forces and moments acting on the steel sheet

$$\Delta z_{21} = \frac{t}{2} - R_0 \sin \varphi_1 + R_0 \sin \varphi_2,$$

$$\Delta y_{21} = H_2 - R_0 (1 - \cos \varphi_1) - R_0 (1 - \cos \varphi_2),$$

$$z_{21} = \Delta z_{21} \cos \varphi_1 + \Delta y_{21} \sin \varphi_1,$$

$$y_{21} = -\Delta z_{21} \sin \varphi_1 + \Delta y_{21} \cos \varphi_1;$$

$$\Delta z_{32} = \frac{t}{2} - R_0 \sin \varphi_2 - R_0 \sin \varphi_3,$$

$$\Delta y_{32} = H_2 - R_0 (1 - \cos \varphi_2) - R_0 (1 - \cos \varphi_3),$$

$$z_{32} = \Delta z_{32} \cos \varphi_2 + \Delta y_{32} \sin \varphi_2,$$

$$y_{32} = -\Delta z_{32} \sin \varphi_2 + \Delta y_{32} \cos \varphi_2;$$

$$\Delta z_{43} = \frac{t}{2} + R_0 \sin \varphi_3 - R_0 \sin \varphi_4,$$

$$\Delta y_{43} = H_4 - R_0 (1 - \cos \varphi_3) - R_0 (1 - \cos \varphi_4),$$

$$z_{43} = \Delta z_{43} \cos \varphi_3 - \Delta y_{43} \sin \varphi_3,$$

$$y_{43} = \Delta z_{43} \sin \varphi_3 + \Delta y_{43} \cos \varphi_3;$$

$$\Delta z_{54} = \frac{t}{2} + R_0 \sin \varphi_4 - R_0 \sin \varphi_5,$$

$$\Delta y_{54} = H_4 - R_0 (1 - \cos \varphi_4) - R_0 (1 - \cos \varphi_5),$$

$$z_{54} = \Delta z_{54} \cos \varphi_4 - \Delta y_{54} \sin \varphi_4,$$

$$y_{54} = \Delta z_{54} \sin \varphi_4 + \Delta y_{54} \cos \varphi_4;$$

$$\Delta z_{65} = \frac{t}{2} + R_0 \sin \varphi_5 - R_0 \sin \varphi_6,$$

$$\Delta y_{65} = H_6 - R_0 (1 - \cos \varphi_5) - R_0 (1 - \cos \varphi_6),$$

$$z_{65} = \Delta z_{65} \cos \varphi_5 - \Delta y_{65} \sin \varphi_5,$$

$$y_{65} = \Delta z_{65} \sin \varphi_5 + \Delta y_{65} \cos \varphi_5;$$

$$\Delta z_{76} = \frac{t}{2} + R_0 \sin \varphi_6 - R_0 \sin \varphi_7,$$

$$\Delta y_{76} = H_6 - R_0 (1 - \cos \varphi_6) - R_0 (1 - \cos \varphi_7),$$

$$z_{76} = \Delta z_{65} \cos \varphi_6 - \Delta y_{76} \sin \varphi_6,$$

$$y_{76} = \Delta z_{65} \sin \varphi_6 + \Delta y_{76} \cos \varphi_6.$$

Проекции главных векторов сил в точках касания листа с роликами определяются как

$$F_{01y} = N_1 \cos \varphi_1 - F_{n1} \sin \varphi_1,$$

$$F_{01z} = N_1 \sin \varphi_1 - F_{n1} \cos \varphi_1;$$

$$F_{02y} = F_{01y} - N_2 \cos \varphi_2 + F_{n2} \sin \varphi_2,$$

$$F_{02z} = F_{01z} + N_2 \sin \varphi_2 + F_{n2} \cos \varphi_2;$$

$$F_{03y} = F_{02y} + N_3 \cos \varphi_3 + F_{n3} \sin \varphi_3,$$

$$F_{03z} = F_{02z} - N_3 \sin \varphi_3 + F_{n3} \cos \varphi_3;$$

$$F_{04y} = F_{03y} - N_4 \cos \varphi_4 - F_{n4} \sin \varphi_4,$$

$$F_{04z} = F_{03z} - N_4 \sin \varphi_4 + F_{n4} \cos \varphi_4;$$

$$F_{05y} = F_{04y} + N_5 \cos \varphi_5 + F_{n5} \sin \varphi_5,$$

$$F_{05z} = F_{04z} - N_5 \sin \varphi_5 + F_{n5} \cos \varphi_5.$$

Добавки к реакциям сил в точках касания листа с роликами составят

$$\Delta N_2 = -F_{01y} \cos \varphi_2 + F_{01z} \sin \varphi_2,$$

$$\Delta F_{n2} = F_{01y} \sin \varphi_2 + F_{01z} \cos \varphi_2;$$

$$\Delta N_3 = F_{02y} \cos \varphi_3 - F_{02z} \sin \varphi_3,$$

$$\Delta F_{n3} = F_{02y} \sin \varphi_3 + F_{02z} \cos \varphi_3;$$

$$\Delta N_4 = -F_{03y} \cos \varphi_4 - F_{03z} \sin \varphi_4,$$

$$\Delta F_{n4} = -F_{03y} \sin \varphi_4 + F_{03z} \cos \varphi_4;$$

$$\Delta N_5 = F_{04y} \cos \varphi_5 - F_{04z} \sin \varphi_5,$$

$$\Delta F_{n5} = F_{04y} \sin \varphi_5 + F_{04z} \cos \varphi_5;$$

$$\Delta N_6 = -F_{05y} \cos \varphi_6 - F_{05z} \sin \varphi_6,$$

$$\Delta F_{n6} = -F_{05y} \sin \varphi_6 + F_{05z} \cos \varphi_6.$$

Нормальные реакции рабочих роликов в точках касания с листом описываются уравнениями

$$N_1 = \frac{M_2 - F_{п1}y_{21}}{z_{21}};$$

$$N_2 = \frac{-M_3 + M_2 - F_{п2}y_{32} - \Delta N_2 z_{32} - \Delta F_{п2}y_{32}}{z_{32}};$$

$$N_3 = \frac{M_4 - M_3 - F_{п3}y_{43} - \Delta N_3 z_{43} - \Delta F_{п3}y_{43}}{z_{43}};$$

$$N_4 = \frac{-M_5 + M_4 - F_{п4}y_{54} - \Delta N_4 z_{54} - \Delta F_{п4}y_{54}}{z_{54}};$$

$$N_5 = \frac{M_6 - M_5 - F_{п5}y_{65} - \Delta N_5 z_{65} - \Delta F_{п5}y_{65}}{z_{65}};$$

$$N_6 = \frac{M_6 - F_{п6}y_{76} - \Delta N_6 z_{76} - \Delta F_{п6}y_{76}}{z_{76}};$$

$$N_7 = \frac{M_6 - F_{п7} [z_{76} \sin(\varphi_6 + \varphi_7) - y_{76} \cos(\varphi_6 + \varphi_7)]}{z_{76} \cos(\varphi_6 + \varphi_7) + y_{76} \sin(\varphi_6 + \varphi_7)}.$$

Нормальные реакции рабочих роликов семироликовой правильной машины при $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $R = 125$ мм, $\sigma_T = 5 \cdot 10^8$ Па, $h = 10$ мм, $t = 270$ мм, $\rho_1 = -1$ м, $H_2 = 12$ мм, $H_4 = 6$ мм и $H_6 = 1$ мм показаны на рис. 4.

Вертикальная сила давления верхней кассеты роликов (сила верхней кассеты роликов) на стальной лист рассчитывается как

$$F_{\text{верх}} = N_2 \cos \varphi_2 - F_{п2} \sin \varphi_2 + N_4 \cos \varphi_4 - F_{п4} \sin \varphi_4 + N_6 \cos \varphi_6 - F_{п6} \sin \varphi_6.$$

Вертикальная сила давления листа на нижнюю кассету роликов равна

$$F_{\text{нижн}} = N_1 \cos \varphi_1 - F_{п1} \sin \varphi_1 + N_3 \cos \varphi_3 - F_{п3} \sin \varphi_3 + N_5 \cos \varphi_5 - F_{п5} \sin \varphi_5 + N_7 \cos \varphi_7 - F_{п7} \sin \varphi_7.$$

Сила давления верхней кассеты роликов на стальной лист при правке на семироликовой машине при $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $R = 125$ мм, $\sigma_T = 5 \cdot 10^8$ Па, $h = 10$ мм, $t = 270$ мм, $\rho_1 = -1$ м, $H_2 = 12$ мм, $H_4 = 6$ мм и $H_6 = 1$ мм составит $F_{\text{верх}} = F_{\text{нижн}} = 1636,86$ кН = 166,856 т.

Правка неплоскостности листа путем деформации осей рабочих роликов. Основной причиной волнистости и коробления листа является его неравномерное обжатие по ширине при горячей прокатке из-за неодинакового размера щели между прокатными роликами. Неравномерное обжатие влечет за собой разную по величине вытяжку отдельных участков листа – более обжатые участки получают большую вытяжку по длине листа, чем менее обжатые. Взаимодействие различно вытянутых продольных участков листа вызывает боль-

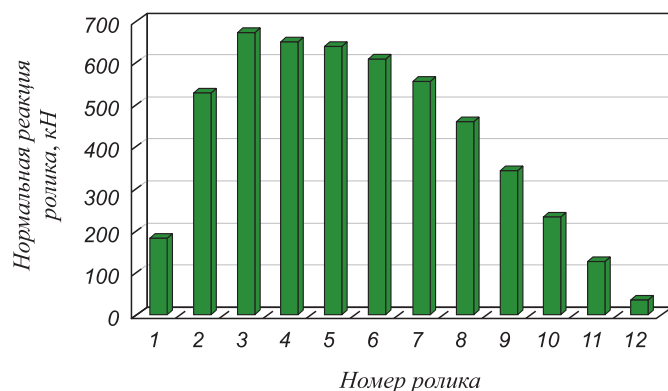


Рис. 4. Нормальные реакции рабочих роликов

Fig. 4. Normal reactions of the working rollers

шие внутренние остаточные напряжения сжатия в более вытянутых участках и напряжения растяжения в менее вытянутых. Эти остаточные напряжения вызывают потерю устойчивости плоской формы листа и образование местной волнистости и коробоватости его поверхности.

Волнистость и коробоватость листов могут быть выправлены только путем выравнивания продольной длины различно обжатых участков листа. Для коррекции местных дефектов листа задается искривление осей нижних рабочих роликов листопрямильной машины с помощью индивидуального перемещения нижних опорных роликов, опирающихся на пять подвижных упоров, что вызывает неравномерный по ширине прогиб листа при правке.

Большому прогибу подвергаются менее вытянутые участки листа. Для каждого вида распределения волнистости и коробоватости по ширине листа требуется специальная настройка машины – выгиб оси рабочих роликов на соответствующих участках.

Выводы. Предложен аналитический метод определения реакций опор рабочих роликов, изгибающих моментов и остаточных напряжений в стенке стального листа при холодной правке на семироликовой листопрямильной машине. Результаты исследований могут быть широко использованы на металлургических заводах при производстве толстого стального листа, а также стальных труб большого и среднего диаметров для нефтегазовых магистральных трубопроводов [1 – 16].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mazur I.P., Dolmatov A.P., Borisov S.S. Investigation and numerical modeling of the process of cold rolling HSLA steels // Materials Science Forum. 2012. Vol. 704 – 705, pp. 832 – 841.
2. Astakhov A.A., Dunaev D.N., Mazur I.P. Machining profiling of the working rolls as a way to control cross-section of the rolled steel // Materials Science Forum. 2013. Vol. 762, pp. 337 – 342.
3. Mazur I.P. Monitoring the surface quality in sheet rolling // Steel in Translation. 2011. Vol. 41. No. 4, pp. 326 – 331.
4. Mazur I., Koinov T. Quality control system for a hot-rolled metal surface // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2014. Vol. 49. No. 1, pp. 71 – 76.

5. Belskiy S.M., Yankova S., Chuprov V.B., Bakhaev K.V., Stoyakin A.O. Temperature field of stripes under hot rolling // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2015. Vol. 50. No. 6, pp. 613 – 616.
6. Belskiy S., Mazur I., Lezhnev S., Panin E. Distribution of linear pressure of thin-sheet rolling across strip width // *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2016. Vol. 51. No. 4, pp. 371 – 378.
7. Mukhin Yu.A., Solov'ev V.N., Bobkov E.B. Formation of the structure of metal in the finishing group of stands of the hot-rolling mill // *Steel in Translation*. 2001. Vol. 31. No. 3, pp. 77 – 80.
8. Mukhin Yu.A., Belyanskij A.D., Zajtsev V.S., Tret'yakov A.I., Baryshev V.G. Production of hot rolled strip with guaranteed mechanical properties // *Steel in Translation*. 1992. No. 12, pp. 61 – 63.
9. Mukhin Yu.A., Belyanskij A.D., Kolpakov S.S., Nikitin V.E., Mel'nikov A.V. Improvement of hot strip rolling conditions to reduce rolled-in scale // *Steel in Translation*. 1993. No. 7, pp. 41 – 43.
10. Shinkin V.N., Kolikov A.P. Simulation of the shaping of blanks for large-diameter pipe // *Steel in Translation*. 2011. Vol. 41. No. 1, pp. 61 – 66.
11. Shinkin V.N., Kolikov A.P. Elastoplastic shaping of metal in an edge-bending press in the manufacture of large-diameter pipe // *Steel in Translation*. 2011. Vol. 41. No. 6, pp. 528 – 531.
12. Shinkin V.N., Kolikov A.P. Engineering calculations for processes involved in the production of large-diameter pipes by the SMS Meer technology // *Metallurgist*. 2012. Vol. 55. No. 11-12, pp. 833 – 840.
13. Zdor V.A., Brovman M.Ya. Casting-rolling unit with cambered rolls // *Russian metallurgy (Metally)*. 2012. Vol. 2012. No. 9, pp. 757 – 762.
14. Brovman M.Ya. Stress state of cylindrical pipe with variable mechanical properties // *Russian engineering research*. 2011. Vol. 31. No. 8, pp. 737 – 741.
15. Brovman M.Ya. Bending deformation of rotating metallic tubes // *Russian metallurgy (Metally)*. 2010. Vol. 2010. No. 9, pp. 779 – 789.
16. Brovman T.V. Design of welded double layer pipelines // *Welding international*. 2012. Vol. 26. No. 7, pp. 553 – 554.

Поступила 17 октября 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 12, pp. 870–874.

CALCULATION OF STEEL SHEET'S CURVATURE UNDER PRELIMINARY FLATTENING ON THE SEVEN-ROLLER STRAIGHTENING MACHINE

V.N. Shinkin

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

Abstract. The mathematical method is proposed for determining the forces and bending moments at preliminary cold flattening of the thick steel sheet on the seven-roller sheet-straightening machine. The calculations allow us to determine the support reaction of working rollers, residual stresses in the wall of steel sheet, the proportion of plastic deformation on the sheet thickness and the relative deformation of the longitudinal surface fibers of the sheet under straightening depending on the rollers' radius. It is also possible to establish the pitch between the straightening machines' working rollers, the magnitude of sheet reduction by the upper rollers, the sheet thickness, as well as elastic modulus, yield stress and hardening modulus of the sheet metal. The results of the research can be used at metallurgical plants.

Keywords: steel sheet, sheet-straightening machines, curvature of sheet, springback coefficient, elastoplastic continuous medium.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-870-874

REFERENCES

1. Mazur I.P., Dolmatov A.P., Borisov S.S. Investigation and numerical modeling of the process of cold rolling HSLA steels. *Materials Science Forum*. 2012, vol. 704-705, pp. 832–841.
2. Astakhov A.A., Dunaev D.N., Mazur I.P. Machining profiling of the working rolls as a way to control cross-section of the rolled steel. *Materials Science Forum*. 2013, vol. 762, pp. 337–342.
3. Mazur I.P. Monitoring the surface quality in sheet rolling. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 4, pp. 326–331.
4. Mazur I., Koinov T. Quality control system for a hot-rolled metal surface. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2014, vol. 49, no. 1, pp. 71–76.
5. Belskiy S.M., Yankova S., Chuprov V.B., Bakhaev K.V., Stoyakin A.O. Temperature field of stripes under hot rolling. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2015, vol. 50, no. 6, pp. 613–616.

6. Belskiy S., Mazur I., Lezhnev S., Panin E. Distribution of linear pressure of thin-sheet rolling across strip width. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2016, vol. 51, no. 4, pp. 371–378.
7. Mukhin Yu.A., Solov'ev V.N., Bobkov E.B. Formation of the structure of metal in the finishing group of stands of the hot-rolling mill. *Steel in Translation*. 2001, vol. 31, no. 3, pp. 77–80.
8. Mukhin Yu.A., Belyanskij A.D., Zajtsev V.S., Tret'yakov A.I., Baryshev V.G. Production of hot rolled strip with guaranteed mechanical properties. *Steel in Translation*. 1992, no. 12, pp. 61–63.
9. Mukhin Yu.A., Belyanskij A.D., Kolpakov S.S., Nikitin V.E., Mel'nikov A.V. Improvement of hot strip rolling conditions to reduce rolled-in scale. *Steel in Translation*. 1993, no. 7, pp. 41–43.
10. Shinkin V.N., Kolikov A.P. Simulation of the shaping of blanks for large-diameter pipe. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 1, pp. 61–66.
11. Shinkin V.N., Kolikov A.P. Elastoplastic shaping of metal in an edge-bending press in the manufacture of large-diameter pipe. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 6, pp. 528–531.
12. Shinkin V.N., Kolikov A.P. Engineering calculations for processes involved in the production of large-diameter pipes by the SMS Meer technology. *Metallurgist*. 2012, vol. 55, no. 11-12, pp. 833–840.
13. Zdor V.A., Brovman M.Ya. Casting-rolling unit with cambered rolls. *Russian metallurgy (Metally)*. 2012, vol. 2012, no. 9, pp. 757–762.
14. Brovman M.Ya. Stress state of cylindrical pipe with variable mechanical properties. *Russian engineering research*. 2011, vol. 31, no. 8, pp. 737–741.
15. Brovman M.Ya. Bending deformation of rotating metallic tubes. *Russian metallurgy (Metally)*. 2010, vol. 2010, no. 9, pp. 779–789.
16. Brovman T.V. Design of welded double layer pipelines. *Welding International*. 2012, vol. 26, no. 7, pp. 553–554.

Information about the author:

V.N. Shinkin, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor of the Chair of Physics (shinkin-korolev@yandex.ru)

Received October 17, 2016

УДК 621.01:621.926.001

АНАЛИЗ РАБОТЫ ШАРНИРА КРИВОШИП – КОРЕННАЯ ОПОРА КРИВОШИПНО-КОРОМЫСЛОВОГО МЕХАНИЗМА ЩЕКОВОЙ ДРОБИЛКИ

Никитин А.Г.¹, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Машины и агрегаты
технологического оборудования» (nikitin1601@yandex.ru)

Абрамов А.В.¹, аспирант кафедры «Машины и агрегаты
технологического оборудования» (alex.abram@mail.ru)

Гредина А.А.¹, магистрант кафедры «Машины и агрегаты
технологического оборудования» (amiliya07@mail.ru)

Гаряшин В.В.², к.т.н., начальник конструкторского отдела (vlgrsh@rambler.ru)

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

² ООО «СпецСвязьОборудование»
(654005, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Орджоникидзе, 28А)

Аннотация. Анализ работы рычажных механизмов, имеющих внутренние степени свободы, которые обусловлены наличием зазоров в шарнирах, показал, что зазоры в шарнирах являются причиной возникновения дополнительных динамических сил. С целью устранения влияния зазоров в шарнирах на возникновение дополнительных динамических сил необходимо выявить закономерности появления импульсных нагрузок. Приведен анализ работы шарнира кривошип – коренная опора с зазором кривошипно-коромыслового механизма щековой дробилки. На основании полученных результатов определено, при каких положениях звеньев механизма происходит пересопряжение контактных поверхностей шарнира кривошип – коренная опора, что позволяет рационально использовать механизмы для выборки зазоров с упругими элементами, которые в течение всего цикла работы кривошипно-коромыслового механизма выбирают зазор в сочленении кривошип – коренная опора и тем самым предотвращают появление дополнительных динамических нагрузок.

Ключевые слова: щековая дробилка, кривошипно-коромысловый механизм, шарнир, зазор, пересопряжение поверхностей, дополнительные динамические силы.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-875-878

Кривошипно-коромысловые механизмы широко используются в качестве привода исполнительных механизмов многих машин, например, в щековых дробилках с одной подвижной щекой [1], подвижность которой обеспечивается шарнирами.

Рычажные механизмы, в том числе и кривошипно-коромысловые, всегда имеют внутренние степени свободы, что связано с наличием зазоров в шарнирах, а также с имеющимися погрешностями изготовления (погрешностями формы сопрягаемых элементов деталей и погрешностями сборки). Эти обстоятельства являются существенными, так как обуславливают соударение деталей во время их относительного движения в зазоре шарнира при работе механизма, когда происходит так называемый перебег зазора, и, как следствие, возникают дополнительные динамические нагрузки [2 – 5].

Точное аналитическое решение задачи определения величины нагрузок, возникающих при соударении звеньев шарнира во время перебега зазора, требует решения систем сложных нелинейных дифференциальных уравнений [6 – 9]. Однако при выявлении закономерности появления импульсных нагрузок и вызывающих

их причин возможно применение линейных уравнений и разработка конструктивных решений, предупреждающих их возникновение [10].

В работе [11] определено, что нарушение контакта в результате пересопряжения рабочих поверхностей в шарнире кривошип – коренная опора кривошипно-коромыслового механизма (перебег зазора) происходит либо при переходе механизма через мертвое положение, либо в случае, когда угол между кривошипом и шатуном составляет 90° . Однако для принятия рациональных конструктивных мероприятий по устранению перебега зазора необходимо определить углы положения кривошипа, при которых угол между кривошипом и шатуном составляет 90° . Рассматривается работа кривошипно-коромыслового механизма щековой дробилки без действия сил технологического сопротивления.

Угол поворота кривошипа α от крайнего положения $OABC$, когда продольная ось шатуна $A'B'$ совпадает с продольной осью кривошипа OA' , до положения $OA'B'C$, при котором угол между кривошипом и шатуном $\theta = \pi/2$, определяется следующим образом (рис. 1):

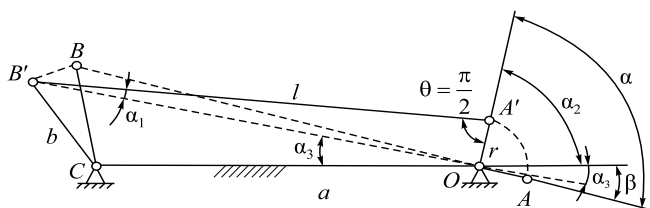


Рис. 1. Схема определения угла между кривошипом и шатуном

Fig. 1. Scheme of determining the angle between the crank and the connecting rod

$$\alpha = \beta + \alpha_2 = \beta + \alpha_2 + \alpha_3 - \alpha_3, \quad (1)$$

где β – угол между осью стойки OC и осью шатуна AB в крайнем положении; α_2 – угол между осью стойки и кривошипом в положении, при котором $\theta = \pi/2$; α_3 – угол между осью стойки и линией, соединяющей шарниры кривошип – коренная опора и шатун – коромысло в положении, при котором $\theta = \pi/2$.

Так как $\alpha_2 + \alpha_3 = \alpha_1 + \theta$ (где α_1 – угол между осью шатуна и линией, соединяющей шарниры кривошип – коренная опора и шатун – коромысло в положении, при котором $\theta = \pi/2$), то выражение (1) примет вид:

$$\alpha = \beta + \alpha_1 - \alpha_3 + \pi/2. \quad (2)$$

Из рис. 1 видно, что

$$\cos \beta = \frac{a^2 + (l-r)^2 - b^2}{2a(l-r)};$$

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{r}{l};$$

$$\cos \alpha_3 = \frac{a^2 + (l+r)^2 - b^2}{2a\sqrt{l^2 + r^2}},$$

где a – длина стойки; l – длина шатуна (подвижной щеки); b – длина распорной плиты; r – эксцентриситет кривошипного вала.

Тогда, подставляя полученные значения в выражение (2), получим

$$\alpha = \arccos\left(\frac{a^2 + (l-r)^2 - b^2}{2a(l-r)}\right) + \operatorname{arctg}\left(\frac{r}{l}\right) - \arccos\left(\frac{a^2 + (l+r)^2 - b^2}{2a\sqrt{l^2 + r^2}}\right) + \frac{\pi}{2}. \quad (3)$$

Если учесть, что эксцентриситет кривошипного вала r значительно меньше длины подвижной щеки l , то выражение (3) можно привести к следующему виду:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \lambda + \frac{\pi}{2},$$

где $\lambda = r/l$ – коэффициент шатуна, равный отношению эксцентриситета кривошипного вала к длине шатуна.

На рис. 2 изображены различные положения пальца кривошипа в обойме подшипника коренной опоры кривошипно-коромыслового механизма, работающего с постоянной угловой скоростью вращения кривошипа, в пределах одного цикла (позиции 1 – 10). Зазор показан в увеличенном масштабе, чтобы можно было видеть относительное положение пальца кривошипа в обойме подшипника коренной опоры.

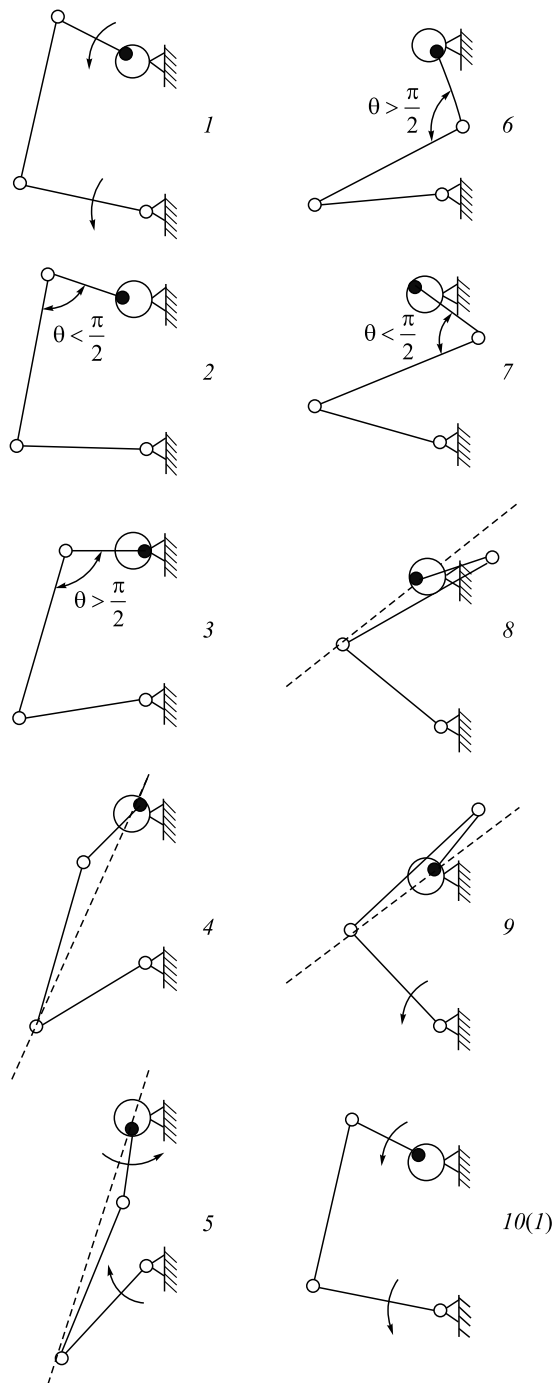


Рис. 2. Различные положения (1 – 10) пальца кривошипа в обойме подшипника коренной опоры кривошипно-коромыслового механизма в пределах одного цикла

Fig. 2. Various positions (1 – 10) of the crank pin in the bearing cage of bearing support of crank-rocker mechanism within one cycle

В положении 1 элементы кинематической пары кривошип–подшипник контактируют между собой, перемещаясь в положение 2. При переходе механизма в положение 3 угол θ между кривошипом и шатуном становится равным $\pi/2$, что соответствует условию нарушения контакта; кривошип с точки контакта, расположенной на левой стороне подшипника, двигается внутри зазора до восстановления контакта, но уже с диаметрально противоположной стороны на правой стороне подшипника, что сопровождается соударением элементов. Дальнейшее движение механизма до положения 4 происходит без нарушения контакта. При переходе механизма из положения 4 в положение 5 контакт снова нарушается из-за смены знака силы реакции, кривошип с точки контакта на верхней полуокружности подшипника перемещается в поле зазора до восстановления контакта на нижней полуокружности с соударением.

При последующем движении механизма вновь наступает случай, когда угол между кривошипом и шатуном составляет $\pi/2$ (переход из положения 6 в положение 7), что опять сопровождается потерей контакта элементов и движением кривошипа внутри зазора до соударения с подшипником при восстановлении контакта. Еще один удар кривошипа о подшипник происходит при переходе механизма из положения 8 в положение 9 из-за смены знака силы реакции. В дальнейшем механизм перемещается до положения 10(1), заканчивая цикл, без нарушения контакта.

За один цикл работы кривошипно-коромыслового механизма (за один оборот кривошипного вала) в кинематической паре кривошип–подшипник коренной опоры с зазором соударение элементов из-за пересопряжения контактных поверхностей происходит четыре раза. При соударении элементов шарниров возможны многократные их отскоки с последующим соударением, вызванные упругими свойствами звеньев, однако в рамках настоящего исследования необходимо выявить положения, при которых происходит первичное пересопряжение поверхностей.

Традиционные способы устранения влияния зазоров в шарнирах на возникновение дополнительных динамических сил с помощью грузового уравнивания [12, 13] положительного эффекта не дают, однако зная, в каких положениях происходит перебег зазора в шарнире кривошип – коренная опора, можно рационально использовать механизмы для выборки зазоров с упругими элементами, например, пружинными [14] или пневматическими [15], которые в течение всего цикла работы кривошипно-коромыслового механизма выбирают зазор в сочленении кривошип – коренная

опора и тем самым предотвращают появление дополнительных динамических нагрузок.

Выводы. Выявлена причина возникновения дополнительных динамических сил при работе шарниров с зазорами. Приведен анализ работы шарнира кривошип – коренная опора с зазором кривошипно-коромыслового механизма щековой дробилки. На основании полученных результатов определено, при каких положениях звеньев механизма происходит пересопряжение контактных поверхностей шарнира кривошип – коренная опора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х т. Т. 1. Машины и агрегаты доменных цехов / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребеник и др.; под ред. А.И. Целикова. – М.: Металлургия, 1987. – 440 с.
2. Юдин К.М. Динамическое исследование модели механизмов с зазорами // Машиноведение. 1971. № 2. С. 58 – 60.
3. Вульфсон И.И. Колебания машин с механизмами циклового действия. – Л.: Машиностроение, 1990. – 309 с.
4. Иванов А.П. Динамика систем с механическими соударениями. – М.: Международная программа образования, 1997. – 336 с.
5. Сергеев В.И., Юдин К.М. Об одной модели механизмов с зазорами // Машиноведение. 1970. № 5. С. 28 – 32.
6. Дубовски С., Норрис М., Алони Е., Тамир А. Теоретическое и экспериментальное изучение явлений в плоских механических системах с зазорами // Конструирование и технология машиностроения. 1984. № 4. С. 148 – 156.
7. Начаев Р.Ф. Механические процессы с повторными затухающими соударениями. – М.: Наука, 1977. – 232 с.
8. Родов Г.М., Иванов В.А. О динамических нагрузках в кривошипных прессах // Кузнечно-штамповочное производство. 1972. № 3. С. 28 – 31.
9. Русаков И.Г., Харкевич А.А. Вынужденные колебания системы, ударяющейся об ограничитель // Журнал технической физики. 1942. Т. 12. № 11-12. С. 715 – 721.
10. Мировпольский Ю.А., Никитин А.Г. Влияние зазоров в кинематических парах на надежность кривошипных кузнечно-прессовых машин // Кузнечно-штамповочное производство. 1999. № 9. С. 23 – 27.
11. Никитин А.Г., Бойко Д.Ю., Вексесер А.Ю. Математическая модель работы шарнира кривошип – коренная опора кривошипно-кулисного механизма щековой дробилки // Изв. вуз. Черная металлургия. 2007. № 10. С. 66, 67.
12. Ланской Е.Н., Церлюк М.Д. Выбор рациональных схем динамического уравнивания кузнечно-прессовых автоматов // Кузнечно-прессовое производство. 1987. № 2. С. 22 – 26.
13. Клушанцев Б.В., Парненко Ю.В. К анализу кинематики щековых дробилок со сложным движением щеки. – В кн.: Сб. трудов ВНИИСтройдормаша. Повышение надежности и производительности дробильно-обогачительного оборудования. Т. 99. – М.: изд. ВНИИСтройдормаш, 1984. С. 3 – 7.
14. А.с. 712266 СССР. Кривошипный пресс / Е.И. Семёнов, А.Ф. Нистратов, В.К. Мальцев; заявл. 01.02.1977; опубл. 30.01.1980. Бюл. № 4.
15. Пат. 2318599 РФ. Щековая дробилка / А.Г. Никитин, Д.Ю. Бойко, А.Ю. Вексесер; заявл. 09.10.2006; опубл. 11.08.2008. Бюл. № 7.

Поступила 15 ноября 2015 г.

ANALYSIS OF CRANK HINGE – RADICAL BEARING OF CRANK-BEAM MECHANISM OF JAW CRUSHER

A.G. Nikitin¹, A.V. Abramov¹, A.A. Gredina¹, V.V. Garyashin²

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

²LLC “SpetsSvyazOborudovanie”, Novokuznetsk, Russia

Abstract. The analysis of lever mechanisms performance, having internal degrees of freedom conditioned by the presence of clearance in joints, has shown that clearances in the joints were the reason of appearance of additional dynamic forces. In order to eliminate the influence of clearances in joints on the origin of additional dynamic forces it is necessary to find regularities of pulse loading appearance. The analysis of the joint performance of a crank–bearing support with a clearance of crank-and-rocker mechanism of a cheek crusher was made. Based on the obtained results it was defined at which positions of mechanism links the contact surfaces changeover of a joint crank – bearing support appears. This allows to use rationally the mechanisms for the choice of clearances with resilient elements, which choose the clearance in a junction crank – bearing support during the cycle of work of crank-and-rocker, thus, preventing the appearance of the additional dynamic loadings.

Keywords: jaw crusher, crank-and-rocker mechanism, joint, clearance, surfaces changeover, additional dynamic forces.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-875-878

REFERENCES

1. Tselikov A.I., Polukhin P.I., Grebenik V.M. etc. *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov. V 3-kh t. T. 1. Mashiny i agregaty domennykh tsekhov* [Machines and devices of metallurgical plants. In 3 vols. Vol. 1. Machines and equipment of blast furnaces]. Tselikov A.I. ed. Moscow: Metallurgiya, 1987, 440 p. (In Russ.).
2. Yudin K.M. Dynamic study of the model of mechanisms with clearances. *Mashinovedenie*. 1971, no. 2, pp. 58–60. (In Russ.).
3. Vul'fon I.I. *Kolebaniya mashin s mekhanizmami tsiklovogo deistviya* [Oscillations of machines with mechanisms of cycle action]. Leningrad: Mashinostroenie, 1990, 309 p. (In Russ.).
4. Ivanov A.P. *Dinamika sistem s mekhanicheskimi soudareniyami* [Dynamics of systems with mechanical collisions]. Moscow: Mezhdunarodnaya programma obrazovaniya, 1997, 336 p. (In Russ.).
5. Sergeev V.I., Yudin K.M. On a model of mechanisms with clearances. *Mashinovedenie*. 1970, no. 5, pp. 28–32. (In Russ.).
6. Dubovski S., Norris M., Aloni E., Tamir A. Theoretical and experimental study of phenomena in planar mechanical systems with clearances. *Konstruirovaniye i tekhnologiya mashinostroeniya*. 1984, no. 4, pp. 148–156. (In Russ.).
7. Nachaev R.F. *Mekhanicheskie protsessy s povtornymi zatukhayushchimi soudareniyami* [Mechanical processes with repeated damped collisions]. Moscow: Nauka, 1977, 232 p. (In Russ.).
8. Rodov G.M., Ivanov V.A. On dynamic loads in crank presses. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo*. 1972, no. 3, pp. 28–31. (In Russ.).
9. Rusakov I.G., Kharkevich A.A. Forced vibration of a system beating against the limiter. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 1942, vol. 12, no. 11–12, pp. 715–721. (In Russ.).
10. Miropol'skii Yu.A., Nikitin A.G. Influence of clearances in kinematic pairs on reliability of crank forging presses. *Kuznechno-shtampovoye proizvodstvo*. 1999, no. 9, pp. 38–45. (In Russ.).
11. Nikitin A.G., Boiko D.Yu., Vekesser A.Yu. Mathematical operational model of the joint crank – bearing crank-rocker mechanism of a jaw crusher. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2007, no. 10, pp. 66–67. (In Russ.).
12. Lansko E.N., Tserlyuk M.D. Choice of rational schemes of dynamic balancing of forging machines. *Kuznechno-pressovoye proizvodstvo*. 1987, no. 2, pp. 22–26. (In Russ.).
13. Klushantsev B.V., Parnenko Yu.V. To analysis of kinematics of jaw crushers with a complex movement of the jaws. In: *Sb. trudov VNIIShtroymasha. Povysheniye nadezhnosti i proizvoditel'nosti drobil'no-obogatitel'nogo oborudovaniya* [Proc. of VNIIShtroymash. Increased reliability and performance of crushing and processing equipment]. Vol. 99. Moscow: VNIIShtroymash, 1984, pp. 3–7. (In Russ.).
14. Semenov E.I., Nistratov A.F., Mal'tsev V.K. *Krivoshipyi press* [Crank press]. Certificate of authorship USSR no. 712266. *Byulleten' izobretenii*. 1980, no. 4. (In Russ.).
15. Nikitin A.G., Boiko D.Yu., Vekesser A.Yu. *Shchekovaya drobilka* [Jaw crusher]. Patent RF no. 2318599. *Byulleten' izobretenii*. 2008, no. 7. (In Russ.).

Information about the authors:

A.G. Nikitin, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair «Machinery and Technological Equipment» (nikitin1601@yandex.ru)
A.V. Abramov, Postgraduate of the Chair «Machinery and Technological Equipment» (email@email)
A.A. Gredina, MA Student of the Chair «Machinery and Technological Equipment» (amiliya07@mail.ru)
V.V. Garyashin, Cand. Sci. (Eng.), Head of Design Department (vlgrsh@rambler.ru)

Received November 15, 2015

УДК 662.73

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИТОПЛИВНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА В ПРАКТИКЕ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ЦЕХОВ*

Подгорецкий Г.С.¹, к.т.н., директор научно-образовательного центра

«Новые металлургические технологии» (podgs@isis.ru)

Третьяк А.А.², заместитель генерального директора (tretiakaa@gmail.com)

Горбунов В.Б.¹, к.т.н., заместитель директора научно-образовательного центра

«Новые металлургические технологии» (vbg1953@mail.ru)

Полулях Л.А.¹, к.т.н., старший научный сотрудник научно-образовательного центра

«Новые металлургические технологии» (larisa_m@isis.ru)

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

² ОАО «Черметинформация»

(117218, Россия, Москва, ул. Кржижановского, д. 14, корп. 3)

Аннотация. Проведен анализ использования пылеугольного топлива (ПУТ) в практике работы доменных печей РФ. Показано, что достигнутый уровень вдувания ПУТ значительно ниже, чем в лучших мировых практиках. Приведены факторы, затрудняющие развитие этого направления в России. Проанализированы мероприятия, предлагаемые для снижения выбросов углекислого газа при производстве чугуна (программа ULCOS). Предложено ввести в состав доменных цехов политопливные газогенераторы барботажного типа для производства горячих восстановительных газов (ГВГ) с целью их последующего вдувания в доменные печи. Выполнен расчет показателей работы доменной печи объемом 1033 м³ с вдуванием до 400 м³/т чугуна ГВГ. При вдувании 400 м³/т ГВГ экономия кокса составляет 100 – 120 кг/т чугуна. Ожидаемая экономия кокса при вдувании 700 м³/т ГВГ – до 200 кг/т чугуна. Предложено создать консорциум ведущих металлургических предприятий для отработки предлагаемой технологии в опытно-промышленном масштабе.

Ключевые слова: доменная печь, пылеугольное топливо, горячий восстановительный газ, политопливный газогенератор.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-879-885

В связи с принятием Россией международного обязательства по сокращению выбросов парниковых газов на 25 % к 2020 г. по сравнению с 1990 г. (указ Президента РФ № 257 от 30 сентября 2013 г.) актуальна проблема реализации энергосберегающих технологий, особенно в такой энергоемкой отрасли, как черная металлургия [1].

В настоящее время в мировой практике производства чугуна широко применяется вдувание пылеугольного топлива (ПУТ) в доменные печи, которое позволяет снизить расход кокса на 150 – 200 кг/т чугуна [2]. Эта технология отработана в промышленном масштабе, но не лишена серьезных недостатков: высокие капиталовложения; очень серьезные требования к качеству шихтовых материалов, кокса и вдуваемых углей. В условиях РФ высокие требования к качеству железорудных материалов и кокса практически не выполняются [3]. Небольшие объемы вдувания ПУТ, связанные с сырьевыми проблемами России, не позволяют окупать значительные вложения в строительство капиталоемких установок.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение № 14.278.21.0065 от 20.10.2014 г., уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57814X0065.

В условиях НПО «Тулачермет» были проведены опытно-промышленные испытания по отмывке колошниковых газов от CO₂ с последующим нагревом и вдуванием полученного горячего восстановительного газа в доменные печи. Расход кокса в опытный период снижался до 350 кг/т чугуна [1]. Аналогичные промышленные эксперименты были проведены консорциумом крупнейших металлургических корпораций и научно-исследовательских институтов на опытно-промышленной доменной печи. Исследования, проведенные в рамках снижения выбросов CO₂ (программа ULCOS), показали перспективность этого направления. Достигнута экономия кокса и снижение выбросов углекислого газа до 35 % [4].

Несмотря на перспективность этого направления, рециклинг колошниковых газов в мире и в РФ тормозится целым рядом обстоятельств; одной из причин является полное использование колошниковых газов в энергосетях комбинатов [5]. В этом случае рециклинг колошниковых газов нецелесообразен, так как необходимо замещать дефицит технических газов природным газом, лимиты на который и так выбираются полностью.

В мире широко распространены технологии газификации углей. Произведенный генераторный газ может

использоваться в качестве энергоносителя для производства электрической и тепловой энергии, использоваться в качестве энергоносителя на предприятиях черной и цветной металлургии, в качестве горячих восстановительных газов (ГВГ) для вдувания в доменные печи. Одной из наиболее перспективных разновидностей технологии газификации углей является их газификация в жидком шлаковом расплаве (в барботажных печах). В настоящей работе предлагается использовать политопливные газогенераторы для производства ГВГ с последующим вдуванием их в доменные печи [6].

Основные показатели работы доменных печей РФ в 2016 г.

За первое полугодие 2016 г. в доменных печах РФ было произведено 29,95 млн. т чугуна. Средний расход кокса на сухую массу составил 413,2 кг/т чугуна, расход каменного угля – 20,6 кг/т (расход ПУТ – 44,3 кг/т), расход природного газа – 96,7 м³/т. Из приведенных данных видно, что вдувание ПУТ в РФ находится на минимальном уровне. Содержание железа в железорудной части шихты (Fe), расходы кокса и ПУТ на металлургических комбинатах РФ приведены ниже.

Комбинат	Fe, %	Расход, кг/т чугуна	
		кокс	ПУТ
ЧерМК	61,60	404,1	17,7*
НЛМК	57,93	370,7	49,1
ММК	58,30	446,6	–
ЕВРАЗ НТМК	57,60	369,0	44,0
ЕВРАЗ ЗСМК	57,33	430,2	39,8
«Тулачермет»	58,70	445,2	–
«УралСталь»	55,50	466,6	–
ЧелМК	н.д.	452,0	–
Навладинский МЗ	55,50	452,0	–
Среднее, РФ	–	413,2	20,6

Примечание. * – загрузка кускового угля в доменные печи.

Наилучшие показатели по суммарному расходу кокса характерны для ОАО «Северсталь», ОАО «НЛМК», ОАО «ЕВРАЗ НТМК». Наибольшее количество ПУТ вдувается на НЛМК и НТМК (49,1 и 44,0 кг/т чугуна соответственно) [7].

Для сравнения в 2013 г. в КНР средний расход кокса составил 362 кг/т чугуна, среднее количество вдуваемого ПУТ – 149 кг/т [8]. Такие высокие показатели работы доменных печей КНР связаны с использованием высококачественных импортных сырьевых материалов. Так, импорт железной руды в КНР в 2013 г. составил 813 млн. т (более 70 % от потребления), импорт коксующихся углей в 2014 г. составил 126 млн. т (около 50 % от потребления) [6]. В условиях РФ достижение

таких показателей по вдуванию ПУТ затруднено, что связано с особенностями сырьевой базы и значительными логистическими затратами.

На рис. 1 приведены энергетические затраты при производстве чугуна на предприятиях РФ в первом полугодии 2016 г. Наилучшие удельные расходы условного топлива наблюдаются на предприятиях ОАО «ЕВРАЗ НТМК», «Тулачермет», НЛМК и ЧерМК. Средняя величина энергоёмкости передельного чугуна по РФ составила 656,3 кг у.т./т чугуна [7].

Учитывая сложности эксплуатации доменных печей, использующих ПУТ для вдувания, можно сделать вывод о необходимости поиска альтернативных путей снижения расхода кокса в доменных печах: одним из вариантов снижения расхода кокса является вдувание ГВГ.

Использование газогенераторов для производства ГВГ

Ранее упоминалось, что вдувание горячих восстановительных газов позволяет радикально снизить расход кокса. Важное мировое направление радикального снижения расхода кокса – программа ULCOS, направленная на снижение выбросов CO₂ при производстве чугуна [4]. Программа ULCOS предусматривает вдувание нагретых восстановительных газов в фурмы и шахту доменных печей. Технология опробована, получена значительная (до 35 %) экономия кокса. В нашей стране подобная технология в 1989 – 1990 гг. прошла опытно-промышленную проверку на «Тулачермет». Колошниковый газ отмывали от CO₂, нагревали и вдували в шахту печи через второй ряд фурм. Расход кокса был снижен до 350 кг/т чугуна. То есть направление вдувания ГВГ прошло предварительную опытно-промышленную проверку и показало свою перспективность [9].

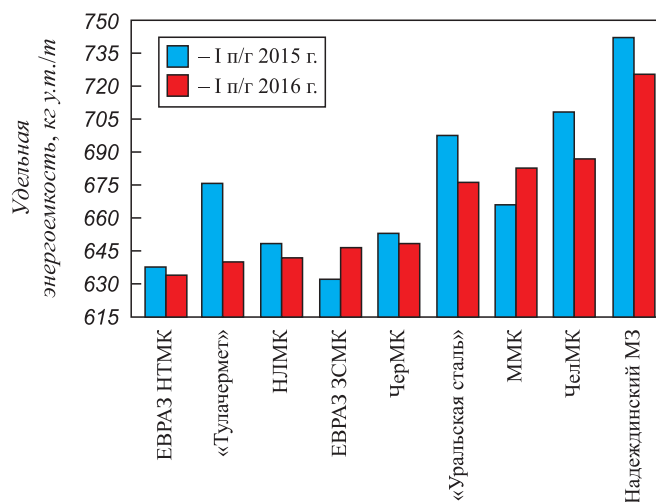


Рис. 1. Удельная энергоёмкость передельного чугуна на предприятиях РФ

Fig. 1. Energy intensity of pig iron at the enterprises of the Russian Federation

В настоящей работе предлагается разместить рядом с доменной печью газогенератор, работающий под давлением 0,4 – 0,6 МПа. Выходящие из газогенератора газы температурой 1500 – 1600 °С и химическим составом $\text{CO} + \text{H}_2 = 85 \div 90 \%$, $\text{N}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = 10 \div 15 \%$ будут проходить первичную очистку (скруббер) и подаваться в существующие фурмы доменной печи через футерованный газопровод. Ориентировочная температура ГВГ на входе в доменную печь – 1200 – 1400 °С.

Предлагается использовать политопливный газогенератор барботажного типа, разработанный в НИТУ «МИСиС» [6]. В мире существует значительное количество технологий газификации углей:

- газификатор Лурги;
- газификатор Винклера;
- газификаторы Копперс-Тотцек, Шелл-Копперс;
- технология газификации Коноко-Филипс;
- технологии газификации Сименс;
- газификатор на базе процесса РОМЕЛТ.

Подробный анализ этих технологий газификации приведен в работе [10].

Отметим недостатки, присущие рассматриваемым технологиям:

- потребность в значительных капиталовложениях, окупаемых только при строительстве крупных установок;

- возможность переработки углей узкого круга, ограниченного маркой и крупностью углей;
- наличие собственных вторичных отходов (зола, отвальный шлак);
- невозможность переработки широкого спектра различных видов твердого топлива;
- недостатки конструкции, необходимость промежуточного охлаждения и компримирования генераторных газов (РОМЕЛТ);
- недостаточная экологическая чистота технологий, наличие экотоксикантов в продуктах переработки.

Практически все эти недостатки устранены в политопливном газогенераторе конструкции НИТУ «МИСиС»: газогенератор нового поколения позволяет эффективно перерабатывать широкий спектр наиболее дешевых углей и другого низкосортного твердого топлива в генераторный газ и/или электроэнергию. В отличие от многих современных технологий сжигания углей зола в политопливном газогенераторе переходит в шлак и далее – в товарные продукты. На базе предлагаемой технологии также возможна реализация совместной переработки твердого топлива со специально подготовленными твердыми бытовыми отходами (ТБО) [11]. Основные элементы конструкции политопливного газогенератора показаны на рис. 2.

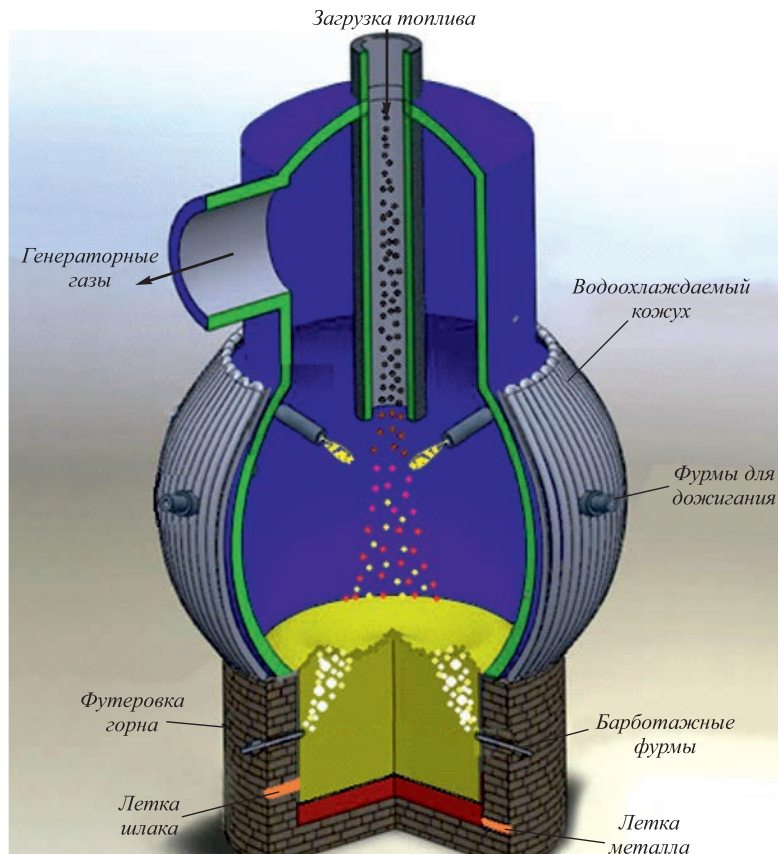


Рис. 2. Политопливный газогенератор конструкции НИТУ «МИСиС»

Fig. 2. Poly-fuel gas generator of NUST “MISIS” design

Технология газификации углей в слое расплавленного шлака рассмотрена в работах [12 – 14]. Отработку технологии газификации осуществляли на опытно-промышленной печи РОМЕЛТ на НЛМК. В ходе опытных кампаний было показано, что в слое барботируемого шлака возможно получать генераторный газ, остаточное содержание окислительных газов и азота в котором не превышает 10 – 15 %. Главными недостатками печи РОМЕЛТ являются ее конструктивные особенности и работа под разрежением. Эти недостатки устранены в конструкции политопливного газогенератора: изменена форма; предусмотрена работа газогенератора под давлением 0,4 – 0,6 МПа.

Другой отличительной особенностью политопливного газогенератора является возможность работы практически на любых видах твердого топлива. Схема установки политопливного газогенератора приведена на рис. 3.

В качестве сырьевых материалов могут быть использованы: угли любых марок; отходы углеобогащения; торф; горючие сланцы; отходы деревообработки; биомасса; отходы нефтепереработки; твердые бытовые отходы.

Продуктами переработки являются: генераторный газ; шлак; металлический сплав; пар энергетических параметров.

В качестве продукта переработки может быть использован также металлический сплав на базе чугуна. Это важно при переработке топлива, содержащего повышенное содержание железа в золе. Другим вариан-

том использования политопливного газогенератора является возможность использования железосодержащих отходов, количество которых определяется тепловым состоянием газогенератора и возможностью увеличивать подачу окислительных газов в доменную печь.

Моделирование вдувания ГВГ в доменные печи

Расчеты выполнены на балансовой модели «Расчет показателей работы доменных печей» кафедры энергоэффективных ресурсосберегающих промышленных технологий НИТУ «МИСиС». Методика базируется на расчетной модели Риста (модель Курунова-Ященко) [15]. Моделирование проводили для условий доменной печи объемом 1033 м³.

Исходные данные для моделирования:

- химический состав шихтовых материалов (принят для условий ММК): агломерат (70 %) и окатыши (30 %);
- содержание железа в агломерате – 52,2 %, в окатышах – 62,5 %;
- основность $[(CaO + MgO)/(SiO_2 + Al_2O_3)]$ агломерата – 2,13, окатышей – 0,38;
- содержание золы в коксе – 11,94 %;
- содержание серы в коксе – 0,52 %;
- содержание кислорода в горячем дутье – 21 %;
- температура дутья – 1120 °С;
- содержание кремния в чугуне – 0,74 %.

Температура ГВГ для всех вариантов принята 1200 °С.

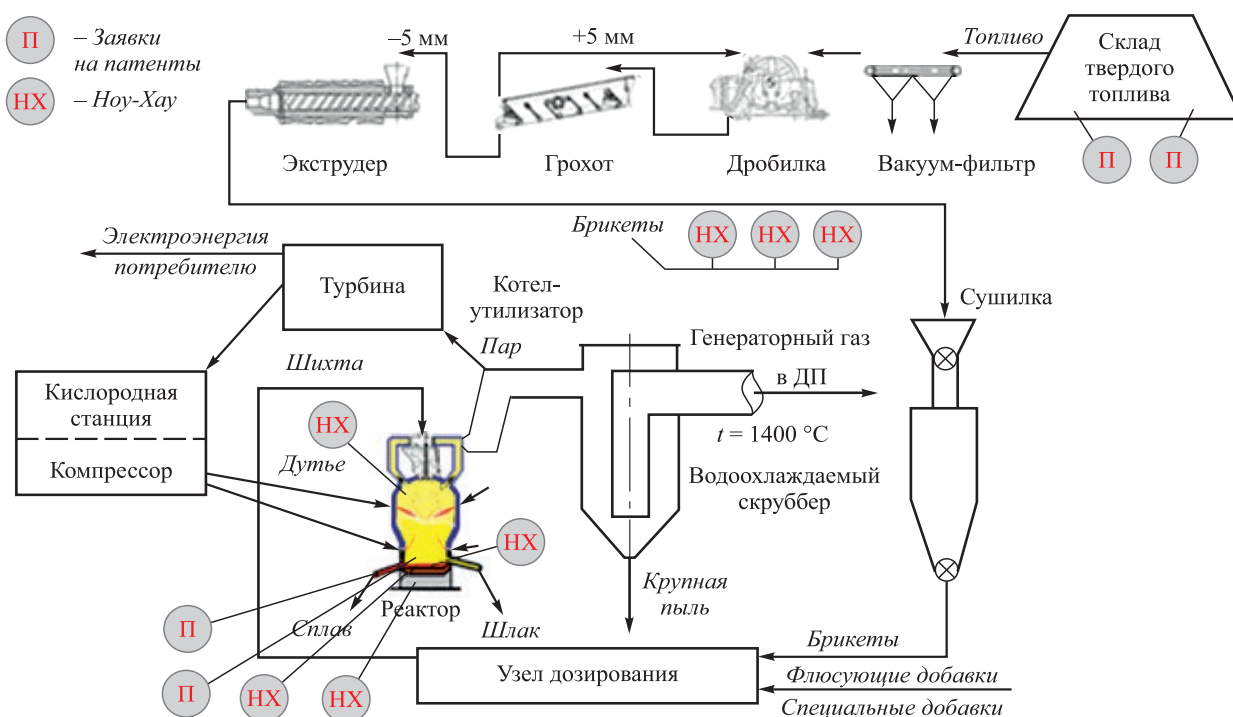


Рис. 3. Схема установки политопливного газогенератора

Fig. 3. Scheme of poly-fuel gas generator

Состав ГВГ:

1 – 70 % CO, 20 % H₂, 10 % смеси N₂ + CO₂ (сухое топливо);

2 – 45 % CO, 45 % H₂, 10 % смеси N₂ + CO₂ (влажное топливо).

Результаты расчетов приведены в таблице.

Вдувание ГВГ на уровне до 400 м³/т чугуна приводит к существенному (до 104 кг/т чугуна) снижению расхода кокса. При этом расход дутья снижается на 200 – 220 м³/т, расход шлака снижается на 10 кг/т. Важно отметить, что производительность печи во всех вариантах не снижается. Несколько возрастают выход и калорийность колошникового газа.

По результатам расчетов можно сделать следующие промежуточные выводы:

- для печи объемом 1033 м³ достаточен (по выходу ГВГ ~ 35 000 м³/ч) газогенератор площадью 5 м²;
- при вдувании 400 м³ ГВГ на 1 т чугуна снижение расхода кокса доходит до 104 кг;
- можно снижать расход кислорода и горячего дутья без потери производительности доменных печей, высвобождающиеся энергоносители при этом могут вдуваться в газогенератор;
- при отработке программы ULCOS объемы вдуваемых ГВГ на опытной печи довели до 700 м³/т чугуна без проблем с газодинамикой; в этом случае возможна экономия кокса до 150 – 180 кг/т чугуна.

Следующим этапом развития предлагаемой технологии является опробование в опытно-промышленном масштабе политопливного газогенератора. В настоящее время НИТУ «МИСиС», ООО «НМТ» совместно с ООО «ПК Вторалюминпродукт», ООО «ПК МЕТПРОМ», ООО «Энерготерм Система» выполнены проектные работы и заканчивается монтаж пилотной установки универсального барботажного реактора в г. Мценске (Орловская область). Основное финансирование проектных работ, закупки узлов, комплектующих и монтажа оборудования пилотной установки осуществлялось ООО «ПК Вторалюминпродукт» без привлечения государственного финансирования. Запуск установки запланирован в декабре 2016 г. На пилотной установке планируется опробование в опытно-промышленном масштабе технологии политопливного газогенератора и отработка режимов работы при газификации различных видов твердого топлива.

Перспективы развития проекта:

- отработка на пилотном реакторе (г. Мценск) в опытно-промышленных масштабах технологий безотходной газификации низкосортных углей, отходов углеобогащения, торфа, горючих сланцев, отходов деревообработки, сельскохозяйственных отходов, биомассы, отходов нефтепереработки, ТБО;

Результаты расчета показателей работы доменной печи при вдувании ГВГ

Calculation results of blast furnace performance when HRG blowing

Параметр		Вариант						
		База	1	2	3	4	5	6
Расход ГВГ, м ³ /т		0	102,6	102,6	205,1	205,1	410,3	410,3
Содержание в ГВГ, %	CO	–	70,0	45,0	70,0	45,0	70,0	45,0
	H ₂	–	20,0	45,0	20,0	45,0	20,0	45,0
	CO ₂	–	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
	N ₂	–	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Температура ГВГ, °C		–	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Результаты расчета								
Производительность, т/сут.		1335,0	1347,8	1356,0	1358,1	1380,4	1376,2	1421,4
Расход кокса, кг/т		496,0	471,4	469,7	447,3	443,5	399,2	391,7
Коэффициент замены, кг/м ³			0,240	0,256	0,237	0,256	0,236	0,254
Расход воздушного дутья, м ³ /т		1233,1	1189,0	1196,3	1143,4	1157,5	1049,1	1074,2
Выход шлака, кг/т		415,9	413,5	413,4	411,1	410,8	406,5	405,9
Основность шлака		1,41	1,42	1,42	1,44	1,44	1,47	1,48
Выход колошникового газа, м ³ /т		1918	1931	1927	1945	1935	1975	1955
Температура колошникового газа, °C		214,5	230,3	227,0	246,6	239,2	278,5	265,3
Содержание колошниковом газе, %	CO	21,09	22,46	21,70	23,80	22,31	26,40	23,45
	CO ₂	19,98	20,45	20,05	20,90	20,15	21,81	20,36
	H ₂	3,78	4,34	5,04	4,90	6,38	6,02	9,08
	N ₂	55,15	52,75	53,21	50,40	51,17	45,76	47,11

- дооснащение пилотной установки оборудованием для подготовки генераторного газа;
- создание консорциума ведущих металлургических предприятий для опытно-промышленной отработки технологии вдувания ГВГ в доменные печи;
- разработка рабочего проекта политопливного газогенератора и комплекса для подачи ГВГ в доменные печи;
- строительство и запуск в эксплуатацию опытно-промышленного комплекса по вдуванию ГВГ.

Выводы. Расчеты, крупно-лабораторные (программа ULCOS), опытно-промышленные (НПО «Тулачермет») эксперименты убедительно показывают, что большей энергоэффективности в доменном переделе можно достичь вдуванием ГВГ, а не ПУТ. В условиях России перспективным источником ГВГ могут стать газогенераторы, основанные на принципах печей барботажного типа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Soskovets O.N., Shevelev L.N., Shatlov V.A., Marsuverskii B.A., Eremin V.I., Roginko S.A. Improving the energy efficiency of blast furnaces by means of hot reducing gases // *Steel in Translation*. 2014. Vol. 44. No. 5. P. 394 – 398.
2. Современный доменный процесс. Введение / М. Геердес, Р. Ченью, И. Курунов и др. – М.: ООО «Металлургиздат», 2016. – 274 с.
3. Требования, предъявляемые к качеству шихтовых материалов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.metalspace.ru/education-career/osnovy-metallurgii/domennaya-pech/397-trebovaniya-pred-yavlyaemye-k-kachestvu-shikhtovykh-materialov.html> (Дата обращения 1 ноября 2016 г.).
4. Ян ван дер Стел, Г. Лоуверсе, Д. Серт, А. Хирш, Н. Эклунд. Доменная печь ULCOS с рециклингом колошниковых газов для минимизации выбросов CO₂ – окончательный результат испытаний // *Steel Times International* на русском языке. 2013. Сентябрь. С. 36 – 38.
5. Шульц Л.А. Энерго-экологические интегральные показатели производства стали // *Экология и промышленность России*. 2004. № 7. С. 30 – 33.
6. Разработка технологии и технических решений политопливного газогенератора на базе местных и возобновляемых топливных ресурсов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://xpir.ru/conference2015/theses/14.578.21.0065> (Дата обращения 1 ноября 2016 г.).
7. Петракова Т.М. Основные показатели работы черной металлургии за период первое полугодие 2016 г. // *Черная металлургия*. Бюл. ин-та «Черметинформация», 2016. № 10. С. 3 – 9.
8. Шевелев Л. Наибольший потенциал снижения выбросов парниковых газов – в доменном производстве [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.time-innov.ru/page/press/overall/article/393> (Дата обращения 1 ноября 2016 г.).
9. Podgorodetskii G.S., Yusfin Yu.S., Sazhin A.Yu., Gorbunov V.B., Polulyakh L.A. Production of Generator Gas from Solid Fuels // *Steel in Translation*. 2015. Vol. 45. No. 6. P. 395 – 402.
10. Метод утилизации твердых бытовых отходов в печи с барботируемым шлаковым расплавом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://misis.ru/spglnk/9fc62f77> (Дата обращения 1 ноября 2016 г.).
11. Иванова И.М. Использование материальных и энергетических ресурсов. // *Черная металлургия*. Бюл. ин-та «Черметинформация», 2016. № 10. С. 9 – 15.
12. Xuegong Bi, Shourong Zhang. The Past. The Present and the Prospects of Ironmaking In China. Proceeding of the 7-th International congress of Ironmaking Technologies. AIST. – 2015. Vol. 1. P. 1472 – 1480.
13. Процесс Ромелт / Под ред. В.А. Роменца. – М.: ИД. «Руда и Металлы», 2005. – 400 с.
14. Газификация угля в шлаковом расплаве / А.В. Баласанов, В.Е. Лехерзак, В.А. Роменец, А.Б. Усачев; под ред. А.Б. Усачева. – М.: «Институт Стальпроект», 2008. – 288 с.
15. Металлургия чугуна: Учебник для вузов / Е.Ф. Вегман, Н.Ф. Жеребин, А.Н. Поквиснев и др.; под ред. Ю.С. Юсфина. – М.: Академкнига, 2004. – 774 с.

Поступила 14 ноября 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 12, pp. 879–885.

PERSPECTIVE USE OF POLY-FUEL GAS GENERATOR IN PRACTICE OF BLAST-FURNACE SHOPS

G.S. Podgorodetskii¹, A.A. Tretyak², V.B. Gorbunov¹, L.A. Polulyakh¹

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

² JSC “Chermetinformatsiya”, Moscow, Russia

Abstract. The analysis of the use of pulverized coal injection (PCI) in the practice of blast furnaces of the Russian Federation was made. It is shown that the current level of injecting of PCI is much lower than in the world's best practices. The factors hindering the development of this direction in Russia are presented. The authors have analyzed the activities suggested in order to reduce carbon dioxide emissions from the production of iron (ULCOS program). It is proposed to enter the poly-fuel gas generators of bubble type into the blast-furnace shops for the production of hot reducing gases (HRG) for subsequent injection into blast furnaces. The calculation was made for the performance of blast furnace with volume of 1033 m³ and HRG injection of up to 400 Nm³/t of cast iron. When such HRG injection the coke savings are 100–120 kg/t of cast iron. Expected savings of coke while HRG

injection of 700 Nm³/t are up to 200 kg/t of cast iron. It is proposed to create a consortium of leading metallurgical enterprises for testing the proposed technology in pilot industrial conditions.

Keywords: blast furnace, pulverized coal, hot reducing gases, poly-fuel gas generator.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-879-885

REFERENCES

1. Soskovets O.N., Shevelev L.N., Shatlov V.A., Marsuverskii B.A., Eremin V.I., Roginko S.A. Improving the energy efficiency of blast furnaces by means of hot reducing gases. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 5, pp. 394–398.
2. Geerdes M., Chen'o R., Kurunov I., Lingardi O., Rikkets D. *Sovremennyy domennyi protsess. Vvedenie* [Modern blast-furnace process. Introduction]. Moscow: ООО “Metallurgizdat”, 2016, 274 p. (In Russ.).
3. *Trebovaniya, pred'yavlyaemye k kachestvu shikhtovykh materialov* [Requirements for the quality of the raw materials]. Available at URL: <http://www.metalspace.ru/education-career/osnovy-metallur>

- gii/domennaya-pech/397-trebovaniya-pred-yavlyayemye-k-kachestvu-shikhtovykh-materialov.html (In Russ.).
4. Yan van der Stel, Louverse G., Sert D., Hirsh A., Eklund N. ULCOS blast furnace with recycling of top gas to minimize CO₂ emissions – the final test results. *Steel Times International. Russian Issue*. September 2013, pp. 36–38. (In Russ.).
 5. Shul'ts L.A. Energy and environmental integrated indicators of steel production. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2004, July, pp. 30–33. (In Russ.).
 6. *Razrabotka tekhnologii i tekhnicheskikh reshenii politoplivnogo gazogeneratora na baze mestnykh i vobnovlyayemykh toplivnykh resursov* [Development of technology and technical solutions of poly-fuel gas generator based on local and renewable fuel resources]. Available at URL: <https://xpir.ru/conference2015/theses/14.578.21.0065> (In Russ.).
 7. Petrakova T.M. Main indicators of ferrous metallurgy during the first half of 2016. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2016, no. 10, pp. 3–9. (In Russ.).
 8. Shevelev L. *Naibol'shii potentsial snizheniya vybrosov parnikovykh gazov v domennom proizvodstve* [The greatest potential for reducing greenhouse gas emissions - in blast furnaces]. Available at URL: <http://www.time-innov.ru/page/press/overall/article/393> (In Russ.).
 9. Podgorodetskii G.S., Yusfin Yu.S., Sazhin A.Yu., Gorbunov V.B., Polulyakh L.A. Production of generator gas from solid fuels. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 6, pp. 395–402.
 10. *Metod utilizatsii tverdykh bytovykh otkhodov v pechi s barbotiruemym shlakovym rasplavom* [The method of solid waste utilization in a furnace with bubbling melted slag]. Available at URL: <http://misis.ru/spglnk/9fc62f77> (In Russ.).
 11. Ivanova I.M. Use of material and energy resources. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2016, no. 10, pp. 9–15. (In Russ.).
 12. Xuegong Bi, Shourong Zhang. The past, the present and the prospects of ironmaking in China. *Proceeding of the 7-th International congress of Ironmaking Technologies. AIST*. 2015, vol. 1, pp. 1472–1480.
 13. *Protsess Romelt* [Romelt process]. Romenets V.A. ed. Moscow: MISiS, ID Ruda i Metally, 2005, 400 p. (In Russ.).
 14. *Gazifikatsiya uglya v shlakovom rasplav* [Coal gasification into slag melt]. Usachev A.B. ed. Moscow: "Institut Stal'proekt", 2008, 288 p. (In Russ.).
 15. Vegman E.F., Zherebin N.F., Pokhvisnev A.N., Yusfin Yu.S., Kurunov I.F., Paren'kov A.E., Chernousov P.I. *Metallurgiya chuguna: uchebnik dlya vuzov* [Ironmaking: Textbook for universities]. Yusfin Yu.S. ed. Moscow: Akademkniga, 2004, 774 p. (In Russ.).
- Acknowledgements.** The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, the agreement no. 14.278.21.0065 of 20.10.2014, unique identifier of the agreement is RFMEFI57814X0065.
- Information about the authors:**
- G.S. Podgorodetskii**, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Scientific and Educational Center "New Metallurgical Technologies" (podgs@misis.ru)
- A.A. Tretyak**, Deputy General Director (tretyakaa@gmail.com)
- V.B. Gorbunov**, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director of the Scientific and Educational Center "New Metallurgical Technologies" (vbg1953@mail.ru)
- L.A. Polulyakh**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Scientific and Educational Center "New Metallurgical Technologies" (larisa_m@misis.ru)

Received November 14, 2016

УДК 621.771.07:621.787.6

ПОВЫШЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПИКОВ МИКРОГЕОМЕТРИИ АВТОМОБИЛЬНОГО ЛИСТА ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ДРОБЕМЁТНОЙ УСТАНОВКИ

Огарков Н.Н., д.т.н., профессор кафедры «Технологии машиностроения» (ogarkovnikolai@mail.ru)

Звягина Е.Ю., старший преподаватель кафедры «Технологии машиностроения» (zviagina_mmf@mail.ru)

Залетов Ю.Д., к.т.н., доцент кафедры «Технологии машиностроения» (yzaletov@mail.ru)

Хоменко Н.Н., доцент кафедры «Механика» (ХомНН@mail.ru)

Керимова Л.Ф., студент (liliya-kerimova@mail.ru)

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
(455000, г. Магнитогорск, Челябинская обл., ул. Ленина, 38)

Аннотация. Выполнены исследования с совершенствованной конструкцией металлических штор в турбине дробемётной установки (ДМУ) для насечки поверхности рабочих валков дрессировочных станов 1700 и 2500 ЛПЦ-5 ОАО «ММК». Шторы помещались в плоскости, перпендикулярной плоскости вращения дробемётного колеса, установленного в турбине. Определены размеры штор и места их установки, обеспечивающие повышенную плотность факела дроби при насечке прокатных валков при минимальном экранирующем действии отскакивающей от штор чугунной колотой дроби. Проведенные исследования показали, что скорость дроби после соударения со шторой меняет не только направление, но и величину. Изменение направления и уменьшение скорости дроби после соударения со шторой зависят от условий трения между дробью и поверхностью шторы, а также от угла атаки. Модернизация ДМУ позволила увеличить плотность пиков факелов дроби на поверхности рабочих валков дрессировочных станов, а соответственно плотность пиков дрессированного металла в 1,22 раза по сравнению с металлом, дрессированным до совершенствования конструкции дробемётной установки.

Ключевые слова: прокатный валок, плотность факела дроби, дробь, дробемётная установка, плотность пиков, шероховатость.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-886-890

Современные конструкции дробемётных установок, используемых для насечения поверхности прокатных валков, характеризуются неравномерной плотностью факела дроби, направленного на рабочую поверхность прокатного валка [1 – 4].

Исследования по распределению плотности факела дроби в плоскости, перпендикулярной его оси, показали, что наибольшей плотностью характеризуется центральная часть факела, а наименьшей его периферийная часть, что не позволяет обеспечить равномерность параметров шероховатости насеченной поверхности [5, 6].

С целью более равномерного распределения плотности факела дроби по насечаемой поверхности был выполнен эксперимент по его воздействию на лист металла размером 2400×1100×1,8 мм, установленного на ролики вместо прокатного валка. Обработка дробью поверхности листа выполнялась при следующих режимах:

- число оборотов дробемётного колеса 2100 об/мин;
- время насечения 8 с.

Распределение плотности факела дроби при насечении поверхности по существующей технологии показано на рис. 1.

Поскольку площадь валка в плоскости, перпендикулярной оси факела дроби, значительно меньше пло-

щади, охватываемой факелом дроби, то часть дроби не участвует в процессе насечки валков и расходится вхолостую [5]. Дробь, которая участвует в насечке, использует не полностью свою кинетическую энергию. Энергия отскакившей дроби далее не используется, поскольку гасится после соударения о стенки камеры дробемётной установки [7 – 9]. След от факела дроби характеризуется тремя зонами: с плотной насечкой поверхности площадью 350×70 мм, средней плотностью насечки площадью 780×100 мм и низкой плотностью насечки площадью 1580×190 мм.

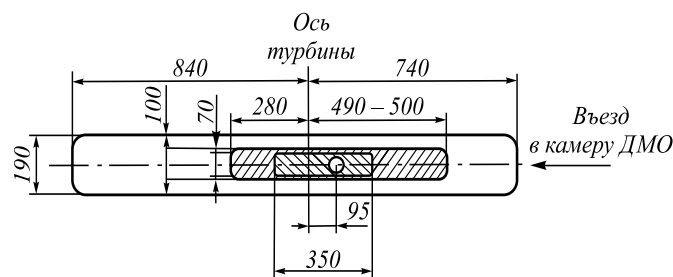


Рис. 1. След от факела дроби на листе металла после обработки по существующей технологии

Fig. 1. Shot torch trace on a metal sheet after treatment with current technology

С целью более полного использования кинетической энергии дробы и улучшения равномерности распределения плотности факела, а также уменьшения количества дробы, не участвующей в насечке, было предложено установить металлические шторы в плоскости, перпендикулярной плоскости вращения дробемётного колеса. Шторы представляют собой металлические пластины из стали 30 размерами 500×170×10 мм, которые прикреплялись к швеллерам дробемётной установки. Наличие штор обеспечивает формирование факела дробы с меньшей площадью и большей плотностью ударов дробы. Большая плотность факела дробы способствует формированию шероховатости насаемой поверхности валка с большим числом пиков на единицу длины шероховатости [10 – 14].

Предварительные исследования показали, что скорость дробы после соударения со шторой меняет не только направление, но и величину. Изменение направления и уменьшение скорости дробы после соударения со шторой зависят от условий трения между дробью и поверхностью шторы, а также от угла атаки. Чрезмерное снижение скорости дробы после соударения со шторой создает нежелательный экранирующий эффект для других дробин, которые направлены непосредственно на поверхность валка. Чем больше снижение скорости дробин после соударения со шторками, тем более явно выражен экранирующий эффект [11].

Для выявления рационального расположения штор выполнены расчеты и определены зависимости между углом атаки, условиями трения и потерей скорости дробы после соударения со шторой.

Расчет предусматривает возможность скольжения и перекатывания дробы по поверхности шторы в момент их соударения. Рассмотрены три случая, когда происходит отскокивание дробы:

- 1) во время перекатывания контактирующих тел;
- 2) в условиях перекатывания и скольжения;
- 3) в условиях абсолютного скольжения.

Процесс соударения дробы с металлической шторой при наличии трения основан на взаимосвязи тангенциального и нормального импульсов при ударе. Угол трения определяется следующей зависимостью [10]:

$$\varphi = \arctg(f) = \arctg \left(\frac{\int_0^t T dt}{\int_0^t N dt} \right), \quad (1)$$

где T и N – соответственно тангенциальная и нормальная сила при ударе; t – время соударения.

Применительно к процессу соударения дробы с массивной шторой запишем следующие уравнения:

$$m\Delta V_t = \int_0^t T dt; \quad (2)$$

$$m\Delta V_n = \int_0^t N dt; \quad (3)$$

$$\frac{mr^2}{R} \Delta\omega = \int_0^t T dt, \quad (4)$$

где ΔV_t , ΔV_n и $\Delta\omega$ – изменение тангенциальной, нормальной и угловой скорости дробы; m – масса дробы; R – плечо силы трения; r – радиус инерции дробы.

Анализ уравнений (2) и (4) показывает, что дробь при соударении со шторой изменяет момент количества движения и получает импульс тангенциальных сил, равный количеству движения $m\Delta V_t$, приобретенному дробью в тангенциальном направлении:

$$m\Delta V_t = \frac{mr^2}{R} \Delta\omega. \quad (5)$$

Из зависимости (1) следует, что значения коэффициента трения скольжения и коэффициента сцепления представляют отношение тангенциального и нормального импульсов за время соударения дробы и шторы:

$$f = \frac{\int_0^t T dt}{\int_0^t N dt}. \quad (6)$$

С учетом равенства (5) выразим эту величину через изменения нормальной и тангенциальной скоростей дробы:

$$f = \frac{\Delta V_t}{\Delta V_n}. \quad (7)$$

Использование импульсного метода дает возможность описать кинематические и фрикционные характеристики процесса соударения дробы о штору с учетом скольжения и перекатывания дробы по ней.

При косом ударе дробы о штору формула (7) преобразуется к виду

$$f = \frac{V_0 \cos \alpha_0 - V_1 \cos \alpha_1}{V_0 \sin \alpha_0 + V_1 \sin \alpha_1}, \quad (8)$$

где V_0 – скорость дробы до удара о штору; α_0 – угол между вектором скорости дробы до удара и поверхностью шторы; V_1 – скорость дробы после удара о штору; α_1 – угол между вектором скорости дробы после удара о штору и поверхностью шторы.

Для приближенной оценки зависимости между V_1/V_0 и коэффициентом трения принимаем $\alpha_0 = \alpha_1$. С учетом принятого уравнение (8) после преобразования имеет вид

$$\alpha = \arctg \left(\frac{V_0 - V_1}{f(V_0 + V_1)} \right). \quad (9)$$

Значение коэффициента трения при соударении дроби со стальной шторой в условиях перекатывания дроби составляет 0,096; в условиях перекатывания и частичного скольжения – 0,125; в условиях скольжения – 0,105.

Зависимости между отношением V_1/V_0 и углом атаки для различных условий взаимодействия дроби со шторой приведены на рис. 2. Потеря скорости дроби после отскока от шторы на 10 % и более вызывает экранирующее действие по отношению к дроби, непосредственно направленной на поверхность вала. Согласно приведенным графикам (рис. 2) потери скорости дроби менее 10 % соответствуют углу атаки в диапазоне углов менее $23 - 28^\circ$ в зависимости от характера взаимодействия дроби со шторой.

Применительно к дробемётной установке «Виллибратор» таким значениям углов атаки соответствуют вертикальное расположение штор длиной 500 мм и расстояниями между ними 600 мм (рис. 3). При потере скорости дроби после отскока от шторы менее 10 % дробь обладает достаточной кинетической энергией для дополнительной насечки поверхности вала, что увеличивает плотность пиков насекаемой поверхности при одинаковом расходе дроби.

Из рис. 3 видно, что значения углов атаки дроби по отношению к поверхности шторы, установленные по ходу вращения дробемётного колеса, изменяются в пределах $8^\circ 50'$ и $28^\circ 19'$, что соответствует соотношению V_1/V_0 от 0,97 до 0,88. Это обеспечивает допустимое экранирующее действие отскакивающей от штор дроби.

Теоретически длина пятна контакта факела дроби с насекаемой поверхностью уменьшается с 1580 до

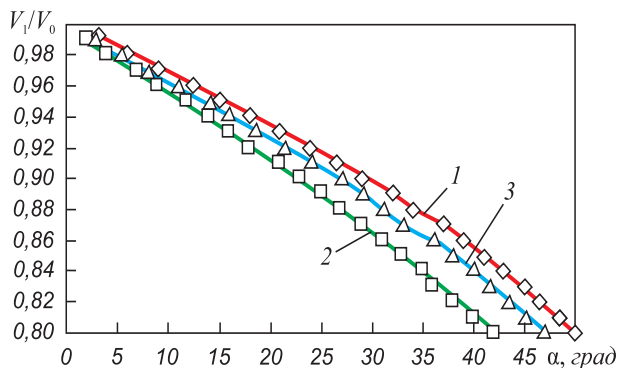


Рис. 2. Влияние угла атаки на потерю скорости дроби после взаимодействия со шторой в различных условиях:
1 – перекатывания; 2 – перекатывания и частичного скольжения;
3 – скольжения

Fig. 2. Angle-of-attack effect on speed loss of shot after interaction with curtain at different conditions:
1 – rolling; 2 – rolling and partial sliding; 3 – sliding

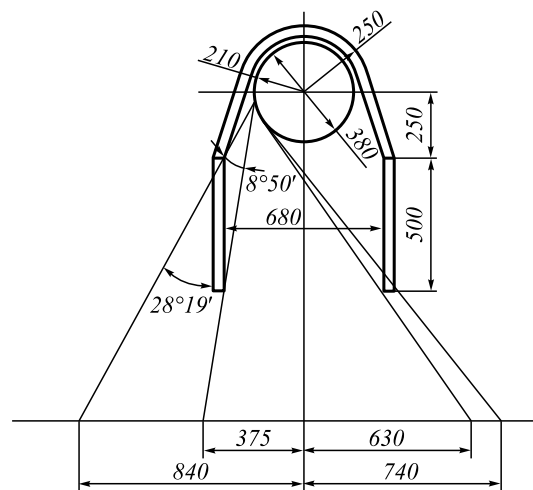


Рис. 3. Схема установки штор на дробемётной установке «Виллибратор»

Fig. 3. Curtains installation scheme of the Willibrator shot blasting machine

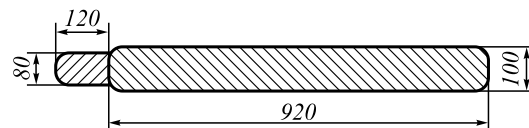


Рис. 4. След от факела дроби на листе металла после обработки дробью со специальным приспособлением в зоне колеса турбины

Fig. 4. Shot torch trace on a metal sheet after shot blasting with special tool in the zone of turbine wheel

1040 мм, что совпадает с размером следа от факела дроби на листе металла (рис. 4). Среднее значение плотности пиков по сравнению с плотностью пиков металла, дрессированного по обычной технологии, увеличилась в 1,22 раза.

Выводы. Установка штор устранила зону с низкой плотностью насечки, уменьшила зону со средней плотностью насечки до площади 120×80 мм и увеличила зону с плотной насечкой до размеров 920×100 мм. По результатам исследований получен патент на полезную модель [15].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Раимбеков А.М., Тевс В.И., Иващенко В.Н., Исаева Т.И. Влияние подготовки валков на формирование микрогеометрии проката при дрессировке // Сталь. 2000. № 6. С. 55 – 57.
2. Салганик В.М., Пивоваров А.В., Пивоваров Ф.В. Прогнозирование микрорельефа поверхности полосы в процессе прокатки и дрессировки. – В кн.: Теория и практика производства листового проката: Сб. тр. Ч. 1. – Липецк: изд. ЛГТУ, 2003. С. 53 – 55.
3. Митин Г.Н., Тимофеев Н.В. Исследование изменений шероховатости поверхности металла при дрессировке // Тезисы докладов международной научно-технической конференции молодых специалистов, посвященной 100-летию со дня рождения легендарного директора комбината Г.И. Носова. – Магнитогорск: изд. МГТУ, 2005. С. 75, 76.
4. Румянцев М.И. Об одном подходе к моделированию шероховатости полосы при холодной прокатке – В кн.: Модели-

рование и развитие процессов обработки металлов давлением: Межрегион. сб. науч. тр. / Под ред. В.М. Салганика. Магнитогорск: изд. МГТУ им. Г.И. Носова, 2015. С. 45 – 59.

5. Огарков Н.Н., Залетов Ю.Д., Ласков С.А., Звягина Е.Ю., Пожидаев Ю.А. Совершенствование дробебетной обработки прокатных валков для производства автомобильного листа // Вестник Магнитогорского государственного технического университета. 2010. № 2 (30). С. 41 – 43.
6. Гусев Ю.В., Косоногова С.А., Дубовов Д.А. Оценка микрогеометрии поверхности листа для деталей кузовов автомобилей // Сталь. 2001. № 8. С. 84, 85.
7. Добронравов В.В., Никитин Н.Н. Курс теоретической механики: Учебник для машиностроит. спец. вузов. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1983. – 575 с.
8. Огарков Н.Н., Беляев А.И., Мухаметдинова Н.П. Формирование параметров поверхностного слоя прокатных валков. – Магнитогорск: изд. МГТУ им. Г.И. Носова, 2012. – 89 с.
9. Лимарев А.С., Маркварт Т.Ю. Анализ поверхностных дефектов на качество холоднокатаного автомобильного листа. – В кн.: Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Межрегион. сб. науч. тр. / Под ред. В.М. Салганика. – Магнитогорск: изд. МГТУ им. Г.И. Носова, 2013. Вып. 19. С. 212 – 217.
10. Залетов Ю.Д., Шекунов Е.В., Нефедьев С.П., Воробьев А.С. Исследование нестабильности качества поверхности рабочих

валков дроссировочных станов и готового автолиста. – В кн.: Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Международный сб. науч. тр. / Под ред. В.М. Салганика. – Магнитогорск: изд. МГТУ, 2012. – 326 с.

11. Бодяев Ю.А., Белов В.К. и др. Получение автолиста с регламентированной микротопографией поверхности. – В кн.: Труды шестого конгресса прокатчиков. Липецк, 18 – 21 октября 2005 г. Т. 2. – М.: изд. ЛГТУ, 2005. С. 167 – 170.
12. Белов В.К., Беглецов Д.О. Моделирование процессов формирования микротопографии поверхности в процессе дроссировки автолиста. – В кн.: Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Межрегион. сб. науч. тр. / Под ред. В.М. Салганика. – Магнитогорск: изд. МГТУ, 2011. С. 58 – 64.
13. Отделка поверхности листа / В.И. Мелешко, А.П. Чекмарев, В.Л. Мазур, А.П. Качайлов. – М.: Металлургия, 1976. – 272 с.
14. Гарбер Э.А., Горелик П.Б., Дилигенский Е.В. и др. Влияние режимов холодной прокатки и микрогеометрии валков на шероховатость холоднокатаных полос // Производство проката. 1999. № 6. С. 7 – 10.
15. Пат. 106579 РФ. Дробебетный аппарат / Огарков Н.Н., Звягин Е.Ю., Залетов Ю.Д. // Бюл. изобретений. 2011. № 20. С. 1076, 1077.

Поступила 17 марта 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 12, pp. 886–890.

INCREASING THE DENSITY OF PEAKS MICROGEOMETRY OF AUTOMOBILE SHEET DUE TO IMPROVEMENT OF THE SHOT-BLASTING UNIT DESIGN

N.N. Ogarkov, E.Yu. Zvyagina, Yu.D. Zaletov, N.N. Khomenko, L.F. Kerimova

Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russia

Abstract. The research of the effect of installing the redesigned iron curtains in the turbine of the shot blasting machine (SBM) for notch of the work rolls surface was carried out for the temper mills “1700” and “2500” of sheet rolling shop – 5 of OJSC “MMK”. Curtains were installed in a plane perpendicular to the plane of rotation of shot blast wheel mounted in a turbine. The sizes of the curtains and place of the installation were determined, providing increased density of shot torch at notch of rolls with minimal shielding action of split shot bounces off the iron curtains. The researches have shown that a fraction speed after collision with a curtain changes not only the direction but also the magnitude. Change of direction and speed reduction of the shot after the collision with the curtain depends on the friction conditions between the shot surface and curtains, as well as the angle of attack. Shot blasting machine modernization provided opportunity to increase the density of shot torch peaks on the surface of work rolls of temper mill, and thus to increase also the density of a trained metal peaks at 1.22 times compared with metal, trained before the improvement of shot blasting machine design.

Keywords: roll, shot torch density, shot, shot blasting machine, peaks density, roll roughening.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-886-890

REFERENCES

1. Raimbekov A.M., Tevs V.I., Ivashchenko V.N., Isaeva T.I. Influence of preparing of rollers on the formation of rolling microgeometry at tempering. *Stal'*. 2000, no. 6, pp. 55–57. (In Russ.).
2. Salganik V.M., Pivovarov A.B., Pivovarov F.V. Forecasting of surface micro relief of the band at rolling. In: *Teoriya i praktika proiz-*

vodstva listovogo prokata: Sb. tr. Ch. 1 [Theory and practice of steel sheet production: Collected papers. Part 1]. Lipetsk: LGTU, 2003, pp. 53–55. (In Russ.).

3. Mitin G.N., Timofeev N.V. Research of changes of metal surface roughness at tempering. In: *Tezisy докладов mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii molodykh spetsialistov, posvyashchennoi 100-letiyu so dnya rozhdeniya legendarnogo direktora kombinata G.I. Nosova* [Abstracts of the International Scientific-Technical Conference of young professionals, dedicated to the 100th Anniversary of legendary plant director G.I. Nosov]. Magnitogorsk: MGTU, 2005, pp. 75–76. (In Russ.).
4. Rumyantsev M.I. On one approach to the modeling of surface roughness formation of a band at cold rolling. In: *Modelirovanie i razvitie protsessov obrabotki metallov davleniem: Mezhhregion. sb. nauch. tr.* [Modeling and development of metal forming processes: Interregional coll. of scientific works]. Salganik V.M. ed. Magnitogorsk: izd. MGTU im. G.I. Nosova, 2015, pp. 45–59. (In Russ.).
5. Ogarkov N.N., Zaletov Yu.D., Las'kov S.A., Zvyagina E.Yu., Pozhidaev Yu.A. Improvement of shot blasting of rollers for the production of automobile sheet. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010, no. 2 (30), pp. 41–43. (In Russ.).
6. Gusev Yu.V., Kosonogova S.A., Dubovov D.A. Evaluation of surface microgeometry of sheets for automotive body parts. *Stal'*. 2001, no. 8, pp. 66–71. (In Russ.).
7. Dobronravov V.V., Nikitin N.N. *Kurs teoreticheskoi mekhaniki: uchebnik dlya mashinostroit. spets. vuzov* [Course of theoretical mechanics: Textbook for machine building institutes]. Moscow: Vysshaya Shkola, 1983, 575 p. (In Russ.).
8. Ogarkov N.N., Belyaev A.I., Mukhametdinova N.P. *Formirovanie parametrov poverkhnostnogo sloya prokatnykh valkov* [Formation of parameters of a surface layer of rolls]. Magnitogorsk: izd. MGTU im. G.I. Nosova, 2012, 89 p. (In Russ.).
9. Limarev A.S., Markvart T.Yu. Analysis of surface defects on the quality of cold-rolled automobile sheet. In: *Modelirovanie i razvitie*

- protseessov obrabotki metallov davleniem: Mezhtregion. sb. nauch. tr.* [Modeling and development of metal forming processes: Interregional coll. of scientific works]. Salganik V.M. ed. Magnitogorsk: izd. MG TU im. G.I. Nosova, 2013, no. 19. pp. 212–217.
10. Zaletov Yu.D., Shekunov E.V., Nefed'ev S.P., Vorob'ev A.S. Research of quality instability of the surface of working rollers of tempering mill and the ready-made automobile sheet. In: *Modelirovanie i razvitie protseessov obrabotki metallov davleniem: Mezhdunarodnyi sb. nauch. tr.* [Modeling and development of metal forming processes: Interregional coll. of scientific works]. Salganik V.M. ed. Magnitogorsk: MG TU, 2012, 326 p. (In Russ.).
 11. Bodyaev Yu.A., Belov V.K. etc. Production of automobile sheet with the regulated surface microtopography. In: *Trudy shestogo kongressa prokatchikov. Lipetsk, 18–21 October, 2005* [Papers of 6th Congress of rollersmen, Lipetsk, 18–21 October, 2005]. Vol. 2. Moscow: LG TU, 2005, pp. 167–170. (In Russ.).
 12. Belov V.K., Begletsov D.O. Modeling of the formation processes of surface microtopography in the process of automobile sheet rolling. In: *Modelirovanie i razvitie protseessov obrabotki metallov davleniem: Mezhtregion. sb. nauch. tr.* [Modeling and development of metal forming processes: Interregional coll. of scientific works]. Salganik V.M. ed. Magnitogorsk: MG TU, 2011, pp. 58–64. (In Russ.).
 13. Meleshko V.I., Chekmarev A.P., Mazur V.L., Kachailov A.P. *Otdelka poverkhnosti lista* [Sheet surface finish]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 272 p. (In Russ.).
 14. Garber E.A., Gorelik P.B., Diligensky E.V. etc. Effect of cold rolling modes and microgeometry of rolls on roughness of cold rolled strips. *Proizvodstvo prokata*. 1999, no. 6, pp. 7–10.
 15. Ogarkov N.N., Zvyagina E.Yu., Zaletov Yu.D. *Drobemetnyi apparat* [Shot-blasting machine]. Patent RF no. 106579. *Byulleten' izobretenii*. 2011, no. 20, pp. 1076–1077. (In Russ.).
- Information about the authors:**
- N.N. Ogarkov**, Dr. Sci. (Eng), Professor of the Chair “Engineering Technology” (ogarkovnikolai@mail.ru)
- E.Yu. Zvyagina**, Senior Lecturer of the Chair “Engineering Technology” (zviagina_mmf@mail.ru)
- Yu.D. Zaletov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Engineering Technology” (yzaletov@mail.ru)
- N.N. Homenko**, Assist. Professor of the Chair “Mechanics” (XomHH@mail.ru)
- L.F. Kerimova**, Student (liliya-kerimova@mail.ru)
- Received March 17, 2016

УДК 669.1:539.382.2:539.374

ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА МАКРОЛОКАЛИЗАЦИЮ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ*

Баранникова С.А.^{1,2}, д.ф.-м.н., доцент, ведущий научный сотрудник (bsa@ispms.tsc.ru)

Косинов Д.А.³, инженер кафедры физики им. В.М. Финкеля (gromov@physics.sibsiu.ru)

Зуев Л.Б.^{1,2}, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией физики прочности,
профессор кафедры «Теория прочности и проектирование» (lbz@ispms.tsc.ru)

Громов В.Е.³, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики
им. В.М. Финкеля (gromov@physics.sibsiu.ru)

Коновалов С.В.³, д.т.н., профессор кафедры физики
им. В.М. Финкеля (konovalov@physics.sibsiu.ru)

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
(634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/4)

² Национальный исследовательский Томский государственный университет
(634034, Россия, Томск, пр. Ленина, 36)

³ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. В работе исследованы особенности локализации пластической деформации при растяжении низкоуглеродистой стали 08пс после горячей прокатки и после процесса электролитического насыщения водородом с использованием трехэлектродной электрохимической ячейки. Установлено усиление локализации пластической деформации после легирования водородом. Анализ стадийности деформационных кривых показал наличие площадки текучести, стадии линейного деформационного упрочнения и стадии параболического деформационного (Тейлоровского) упрочнения. Для выявления и визуализации зон локализованной деформации был использован метод двухэкспозиционной спекл-фотографии, позволяющий получить количественные характеристики деформации, т.е. определить поле векторов смещения в плоском образце при растяжении и далее рассчитать компоненты тензора пластической дисторсии (локальные удлинения ϵ_{xx} , сдвиг ϵ_{xy} и поворот ω_z). Определены основные типы и параметры локализации пластического течения на разных стадиях деформационного упрочнения.

Ключевые слова: сталь, пластичность, спекл-фотография, локализация деформации, водородное охрупчивание, стадийность, тензор дисторсии, прокатка.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-891-895

В настоящее время в результате накопленных экспериментальных и теоретических исследований [1 – 4] становится все более очевидным, что при прогнозировании долговечности конструкций, изготовленных практически из любого металла и сплава, нужно учитывать степень вредного влияния, которое оказывает водород на свойства металлов и сплавов при их выдержке в любой водородсодержащей среде на стадиях изготовления, обработки и в процессе эксплуатации.

Процесс водородного охрупчивания является следствием действия многих факторов. Определяющую роль при этом играют фазовый состав, структура, размеры, морфология вторых фаз, дефектная субструктура и сос-

тояние твердого раствора материала [5 – 9]. Большинство из этих факторов взаимосвязаны, что затрудняет понимание и прогнозирование процесса в целом.

При травлении горячекатаных катанки и полос кислоты, кроме реакции с окислами, воздействует и на сталь с выделением атомарного водорода, который, с одной стороны, способствует механическому отрыву нерастворенной окислы от поверхности, а с другой, диффундируя в металл, вызывает явление охрупчивания. Растворенный водород приводит к существенному изменению механических и физико-химических свойств материала из-за образования дефектной структуры [10].

Экспериментальные данные о природе пластической деформации показывают, что присущая ей с самого начала деформирования неоднородность может приводить к раннему формированию одного или нескольких устойчивых очагов локализации пластического течения. Исследования макролокализации деформации позволили установить однозначное соответствие меж-

* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Государственной академии наук в 2015 – 2020 гг. и Программы «Научный фонд им. Д.И. Менделеева Томского государственного университета» в 2016 г. и гранта РФФИ № 16-08-00385-а.

Считаем своим приятным долгом выразить благодарность М.В. Надежкину, А.Г. Луцеву и В.В. Горбатенко за помощь в проведении экспериментов и обсуждении результатов работы.

ду законом пластического течения на данном участке деформационной кривой и типом пространственно-временного распределения компонент тензора пластической дисторсии [11].

Знание закономерностей и природы локального течения материалов может существенно облегчить процесс их пластического формоизменения, что особенно важно при горячей и холодной прокатке полос, для которых локализация деформации может приводить к появлению дефектов и разрушению [12].

Целью настоящей работы является сравнительный анализ влияния водорода на картины локализации деформации на разных стадиях нагружения растяжением низкоуглеродистой стали.

В качестве материала исследования использовали конструкционную сталь 08пс. Испытания на растяжение были выполнены на плоских образцах в форме двойной лопатки с размерами рабочей части $50 \times 10 \times 2$ мм. Как и в работе [13] образцы растягивали на универсальной испытательной машине «Instron-1185» при комнатной температуре с постоянной скоростью перемещения подвижного захвата $V_m = 0,2$ мм/мин. Для исследований макроскопической локализации пластического течения использовали технику двухэкспозиционной спекл-фотографии [11], сочетающей в себе возможности наблюдения всего деформируемого образца в целом (характерный размер поля зрения примерно 100×100 мм) с разрешающей способностью на уровне оптического микроскопа (приблизительно 1 мкм). Образцы вырезали из полос после горячей прокатки (исходное состояние 1) и подвергали насыщению водородом (состояние 2).

Наводороживание образцов осуществляли в трехэлектродной электрохимической ячейке при постоянном контролируемом катодном потенциале $U = -600$ мВ, задаваемом относительно хлор-серебряного электрода сравнения, в 1N растворе серной кислоты с добавлением 20 мг/л тиомочевины при температуре 323 К в течение 24 ч. Вольтамперные кривые фиксировали с помощью потенциостата IPC-Compass. До испытаний наводороженные образцы хранили в жидком азоте.

Для исследования кинетики развития неоднородной пластической деформации использовали измерительные комплексы ALMEC с фотографической и ALMEC-tv цифровой регистрацией изображения [14, 15], позволяющие восстанавливать поле векторов смещения и вычислять компоненты тензора пластической дисторсии ϵ_{xx} , ϵ_{xy} (локальные удлинение и сужение).

Из зависимостей координат очагов локализации X от времени t , наложенных на диаграмму пластической деформации, получены количественные данные о кинетике локализации пластического течения вдоль всей кривой $\sigma(\epsilon)$. Из зависимостей $X(t)$ определяются пространственный λ и временной T периоды соответствующих процессов, а затем вычисляется скорость движения очагов локализованной пластичности $V_{aw} = \lambda/T$ [11].

Структура стали в исходном состоянии представляет собой α -железо (феррит) со следами перлита. Средний размер зерна $14,3 \pm 6,4$ мкм.

Деформационные кривые образцов имели площадку текучести, стадии линейного и параболического деформационного упрочнения. В исходном состоянии (1) площадка текучести (при нулевом коэффициенте деформационного упрочнения $\theta_l = 0$) вместе с зубом текучести имела протяженность 2,5 % и была обусловлена зарождением и распространением по образцу полос Людерса. Анализ распределений локальных деформаций показал, что пластическая деформация с самого начала нагружения распределена по образцу неоднородно, то есть локализована в зонах макроскопического масштаба, в то время как другие объемы при этом же приросте деформации практически не деформируются. Распределения локальных удлинений на площадке текучести (рис. 1, вставка, кривая 1) представляли собой зону локализованной деформации 1 (полосу Людерса), зародившуюся вблизи неподвижного захвата испытательной машины (рис. 2, а). Фронт пластической деформации 1 перемещался от неподвижного захвата с постоянной скоростью $V_I \sim 8,5 \cdot 10^{-5}$ м/с (рис. 3, а). Далее на площадке текучести в средней части образца зарождалась зона локализованной деформации 2 (рис. 2, б), которая на протяжении площадки текучести двигалась с постоянной скоростью $V_{II} \sim 3,8 \cdot 10^{-5}$ м/с по направлению к подвижному захвату (рис. 3, а). Затем фронт пластической деформации 1 начинает двигаться с меньшей скоростью $V_{I'} \sim 3,5 \cdot 10^{-5}$ м/с (рис. 3, а). В этот момент времени вблизи зоны локализованной деформации 2 зарождается новая зона локализованной деформации 3 (рис. 2, в), которая начинает двигаться с постоянной скоростью $V_{III} \sim 6,8 \cdot 10^{-5}$ м/с в противоположном направлении к зоне локализованной деформации

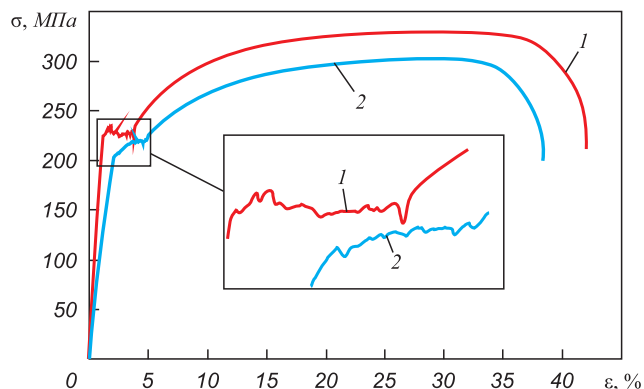


Рис. 1. Кривые нагружения стали 08пс при комнатной температуре: 1 – образцы в состоянии после горячей прокатки; 2 – образцы в состоянии после электролитического насыщения в трехэлектродной ячейке в течение 24 ч (на вставке выделена площадка текучести)

Fig. 1. Load curves of low-carbon 08ps steel at room temperature: 1 – samples after hot rolling; 2 – samples after hydrogen charging for 24 hours in a thermostatic three-electrode cell (framing shows yield plateau)

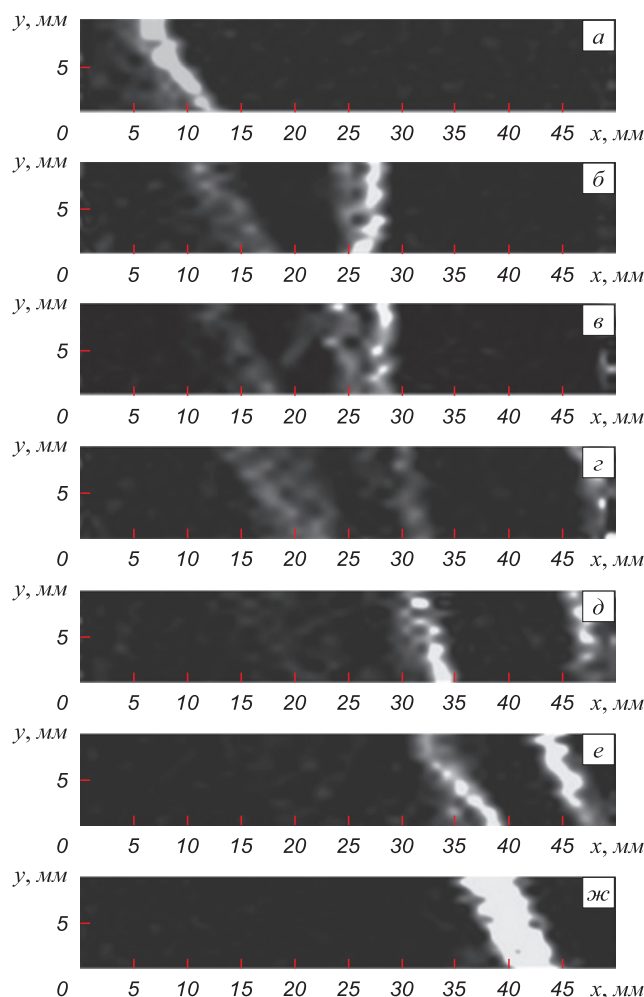


Рис. 2. Картины локализации пластической деформации стали 08пс в состоянии 1 в виде полутоновых картин на площадке текучести (зарождение (а) и распространение (б – ж) полос Чернова-Людера по длине образца)

Fig. 2. Patterns of the localization of plastic deformation of 08ps steel for state 1, as halftone image, on yield plateau: (a) nucleation and (б – ж) propagation of the Lüders band through the sample

ции 1 (рис. 3, а). Зоны локализованной деформации 1 и 3 движутся навстречу друг другу, и после «встречи» происходит их взаимное «гашение» (рис. 2, з). Далее на площадке текучести по направлению к подвижному захвату продолжает двигаться зона локализованной деформации 2 (рис. 3, а). Затем вблизи подвижного захвата зарождается новая зона локализованной деформации 4 (рис. 2, д), которая начинает двигаться с постоянной скоростью $V_{IV} \sim 8,5 \cdot 10^{-5}$ м/с по направлению к неподвижному захвату (рис. 3, а). Зоны локализованной деформации 2 и 4 движутся навстречу друг другу (рис. 2, е) и после их «встречи» (рис. 2, ж) площадка текучести заканчивается. На стадии линейного деформационного упрочнения протяженностью 2,5 % с постоянным коэффициентом деформационного упрочнения ($\theta = 700$ МПа) пространственный период волн локализации деформации составляет $8,0 \pm 1,0$ мм, а скорость их распространения $V_{II} \sim 5,3 \cdot 10^{-5}$ м/с (рис. 3, б).

Результаты механических испытаний образцов в состоянии 2 показали, что в исходном состоянии без водорода и после электролитического насыщения водородом в течение 24 ч наблюдается снижение характеристик прочности и пластичности на 10 % (рис. 1, кривая 2).

Влияние водорода на деформационное поведение становится заметным в начальный момент пластической деформации. В состоянии 2 вместо горизонтальной площадки текучести наблюдается «пилообразный» участок деформационной кривой с постоянным коэффициентом деформационного упрочнения ($\theta = 450$ МПа) протяженностью до 4,8 % (рис. 1, вставка, кривая 2). На этой стадии распределений локальных деформаций представляли собой две зоны локализованной деформации (полосы Людера) (рис. 4), которые перемещались навстречу друг другу со скоростями $1,4 \cdot 10^{-4}$ и $5,5 \cdot 10^{-5}$ м/с (рис. 5, а). «Встреча» описываемых очагов деформации соответствовала окончанию стадии площадки текучести. На стадии линейного деформационного упрочнения протяженностью 2,5 % с постоянным коэффициентом деформационного упрочнения ($\theta = 730$ МПа) распределения локальных деформаций представляют собой расположенные на

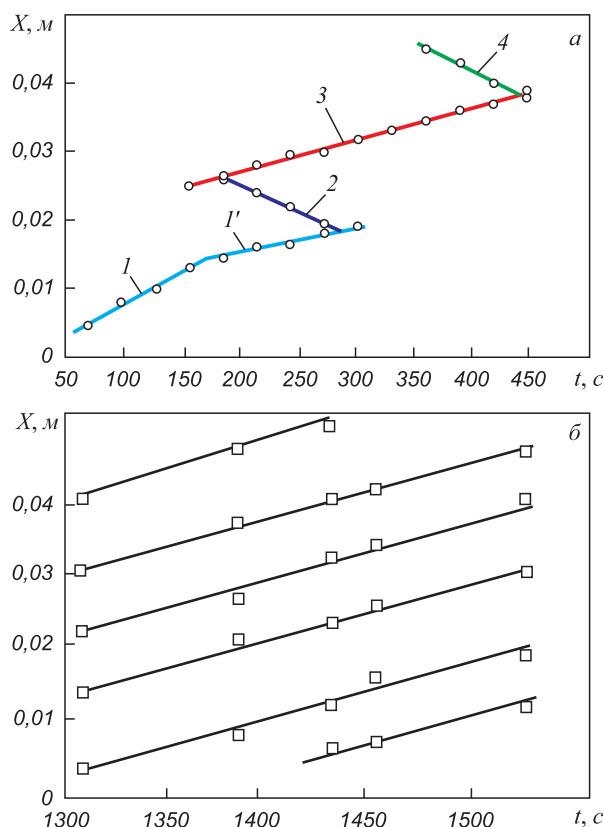


Рис. 3. Диаграмма пространственно-временной эволюции очагов локализованной деформации ϵ_{xx} стали 08пс в состоянии 1: а – на площадке текучести; б – на стадии линейного деформационного упрочнения

Fig. 3. Diagram of spatio-temporal evolution of localized deformation sites ϵ_{xx} of 08ps steel for state 1: а – on yield plateau; б – on linear work-hardening stage

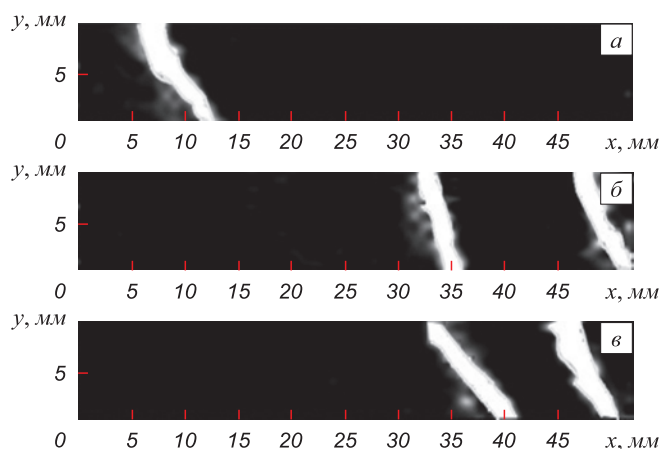


Рис. 4. Картины локализации пластической деформации стали 08пс в состоянии 2 в виде полутоновых картин на площадке текучести (распространение (а – в) полос Чернова-Людерса по длине образца)

Fig. 4. Patterns of the localization of plastic deformation of 08ps steel for state 2, as half-tone image, on yield plateau: (а – в) propagation of the Chernov-Lüders band through the sample

одинаковых расстояниях $6,0 \pm 1,0$ мм зоны локализации деформации. На протяжении стадии линейного деформационного упрочнения эти зоны локализации перемещались с постоянной скоростью $V_{II} = 8,3 \cdot 10^{-5}$ м/с (рис. 5, б).

Выводы. Выявлена роль водорода в локализации пластической деформации на площадке текучести (при нулевом или малом уровне коэффициента деформационного упрочнения) и на стадии линейного деформационного упрочнения с постоянным коэффициентом деформационного упрочнения в стали 08пс. Показано, что площадка текучести обусловлена зарождением и распространением по образцу полос Людерса. В состоянии после горячей прокатки, на площадке текучести отмечено движение четырех зон локализованной деформации, а в состоянии после электролитического насыщения водородом зафиксировано движение двух зон локализованной деформации навстречу друг другу. В наводороженных образцах установлен эффект усиления локализации пластической деформации по сравнению с исходным состоянием. Это проявилось в изменении структуры очага локализации деформации и изменении пространственного периода распределений локальных деформаций на стадии линейного деформационного упрочнения и связано с влиянием водорода на параметры макроскопической локализации пластической деформации. Полученные результаты могут быть использованы при разработке критериев оценки технологической пластичности при горячей и холодной прокатке сталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полторацкий Л.М., Громов В.Е., Чинокалов В.Я. Водород в сталях и сплавах. (Современное состояние вопроса). – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2008. – 162 с.

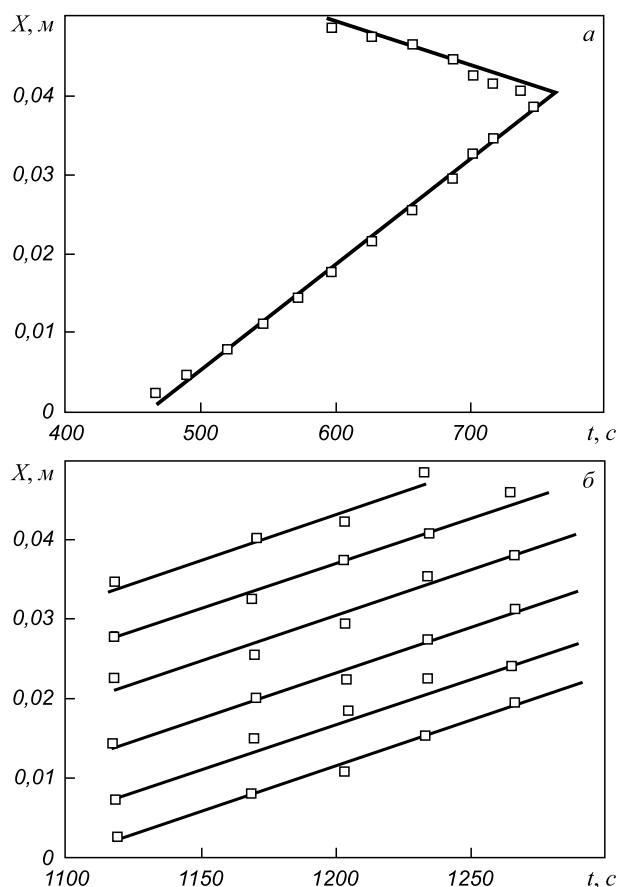


Рис. 5. Диаграмма пространственно-временной эволюции очагов локализованной деформации ε_{xx} стали 08пс в состоянии 2: а – на площадке текучести; б – на стадии линейного деформационного упрочнения

Рис. 5. Diagram of spatio-temporal evolution of localized deformation sites ε_{xx} of 08ps steel for state 2: а – on yield plateau; б – on linear work-hardening stage

2. Hillier E.M.K., Robinson M.J. Hydrogen embrittlement of high strength steel electroplated with zinc-cobalt alloys // Corros. Sci. 2004. Vol.46. P. 715 – 727.
3. Askari A., Das S. Practical numerical analysis of a crack near a weld subjected to primary loading and hydrogen embrittlement // J. Mater. Process. Tech. 2006. Vol. 173. P. 1 – 13.
4. Panagopoulos C.N., El-Amoush A.S., Georgarakis K.G. The effect of hydrogen charging on the mechanical behaviour of a-brass // J. Alloys. Compd. 2005. Vol. 392. P. 159 – 164.
5. Sofronis P., Liang Y., Aravas N. Hydrogen induced shear localization of plastic flow in metals and alloys // Eur. J. Mech. A: Solids. 2001. Vol. 20. P. 857 – 872.
6. Колачев Б.А. Водородная хрупкость металлов. – М.: Металлургия, 1985. – 216 с.
7. Ramunni V.P., De Paiva Coelho T., de Miranda P.E.V. Interaction of hydrogen with the microstructure of low-carbon steel // Mater. Sci. Eng. 2006. Vol. A 435-436. P. 504 – 514.
8. Hardie D., Xu J., Charles E.A., Wei Y. Hydrogen embrittlement of stainless steel overlay materials for hydrogenators // Corros. Sci. 2004. Vol. 46. P. 3089 – 3100.
9. Yagodzinsky Y., Saukkonen T., Kilpeläinen S., Tuomisto F., Hänninen H. Effect of hydrogen on plastic strain localization in single crystals of austenitic stainless steel // Scripta Mater. 2010. Vol. 62. P. 155 – 158.
10. Алефельд Г., Фелькль И. Водород в металлах. Т. 1. Основные свойства. – М.: Мир, 1981. – 476 с.; Т. 2. Прикладные аспекты. – М.: Мир, 1981. – 430 с.

11. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Баранникова С.А. Физика макролокализации пластического течения. – Новосибирск: Наука, 2008. – 327 с.
12. Производство листового проката в валках переменного сечения / О.Е. Браунштейн, В.И. Базайкин, В.Е. Громов, В.В. Дорофеев. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2008. – 116 с.
13. Шляхова Г.В., Баранникова С.А., Зуев Л.Б., Косинов Д.А. Локализация пластической деформации в монокристаллах легированного γ -железа при электролитическом насыщении водородом // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 8. С. 37 – 42.
14. Джоунс Р., Уайкс К. Голографическая и спекл-интерферометрия. – М.: Мир, 1986. – 327 с.
15. Zuev L.B., Gorbatenko V.V., Pavlichev K.V. Elaboration of speckle photography techniques for plastic flow analyses // Measur. Sci. Technol. 2010. Vol. 21. No. 5. P. 054014 – 054019.

Поступила 7 ноября 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 12, PP. 891–895.

HYDROGEN EFFECT ON MACROLOCALIZATION OF PLASTIC DEFORMATION OF LOW CARBON STEEL

S.A. Barannikova^{1,2}, D.A. Kosinov³, L.B. Zuev^{1,2}, V.E. Gromov³, S.V. Kononov³

¹ Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russia

² National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

³ Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. The paper presents the localization of the plastic deformation features. The studies were performed for the test samples of low-carbon 08ps steel sheet after hot rolling as a result of electrolytic saturation by hydrogen in a thermostatic three-electrode cell at constant potential. Enhancement of the localization of plastic deformation was established. Analysis of the stages of the stress-strain curves revealed the yield line, linear work-hardening stage and (Taylor) parabolic work-hardening stage. Using the speckle-photography technique, the patterns of plastic deformation localization were exposed with subsequent determination of the displacement vector field in the flat sample and calculation of the components of the tensor plastic distortion (local elongation ϵ_{xx} , ϵ_{yy} shift and rotation ω_z). The main type and parameters of the localization of plastic flow for distinct work-hardening stages were determined.

Keywords: steel, plasticity, speckle-photography, deformation localization, hydrogen embrittlement, staging, distortion tensor, rolling.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-891-895

REFERENCES

1. Poltoratskii L.M., Gromov V.E., Chinokalov V.Ya. *Vodorod v stalyakh i splavakh (Sovremennoe sostoyanie voprosa)* [Hydrogen in steels and alloys. (Modern state of the question)]. Novokuznetsk: SibGIU, 2008, 162 p. (In Russ.).
2. Hillier E.M.K., Robinson M.J. Hydrogen embrittlement of high strength steel electroplated with zinc-cobalt alloys. *Corros. Sci.* 2004, vol. 46, pp. 715–727.
3. Askari A., Das S. Practical numerical analysis of a crack near a weld subjected to primary loading and hydrogen embrittlement. *J. Mater. Process. Tech.* 2006, vol. 173, pp. 1–13.
4. Panagopoulos C.N., El-Amoush A.S., Georgarakis K.G. The effect of hydrogen charging on the mechanical behaviour of α -brass. *J. Alloys. Compd.* 2005, vol. 392, pp. 159–164.
5. Sofronis P., Liang Y., Aravas N. Hydrogen induced shear localization of plastic flow in metals and alloys. *Eur. J. Mech. A: Solids.* 2001, vol. 20, pp. 857–872.
6. Kolachev B.A. *Vodorodnaya khrupkost' metallov* [Hydrogen fragility of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 216 p. (In Russ.).
7. Ramunni V.P., De Paiva Coelho T., de Miranda P.E.V. Interaction of hydrogen with the microstructure of low-carbon steel. *Mater. Sci. Eng.* 2006, vol. A 435–436, pp. 504–514.
8. Hardie D., Xu J., Charles E.A., Wei Y. Hydrogen embrittlement of stainless steel overlay materials for hydrogenators. *Corros. Sci.* 2004, vol. 46, pp. 3089–3100.
9. Yagodzinskyy Y., Saukkonen T., Kilpeläinen S., Tuomisto F., Hänninen H. Effect of hydrogen on plastic strain localization in single crystals of austenitic stainless steel. *Scripta Mater.* 2010, vol. 62, pp. 155–158.
10. Georg Alefeld, Johann Völkl. *Hydrogen in Metals*. Vol. 1. *Basic Properties*. Vol. 2. *Application-Oriented Properties*. Springer-Verlag, 1978. (Russ.ed.: Alefeld G., Völkl J. *Vodorod v metallakh*. T. 1. *Osnovnye svoystva*. T. 2. *Prikladnye aspekty*. Moscow: Mir, 1981.).
11. Zuev L.B., Danilov V.I., Barannikova S.A. *Fizika makrolokalizatsii plasticheskogo techeniya* [Physics of plastic flow macrolocalization]. Novosibirsk: Nauka, 2008, 327 p. (In Russ.).
12. Braunshtein O.E., Bazaikin V.I., Gromov V.E., Dorofeev V.V. *Proizvodstvo listovogo prokata v valkakh peremennogo secheniya* [Production of sheet metal in rolled sheets in rollers of variable cross-sections]. Novokuznetsk: SibGIU, 2008, 116 p. (In Russ.).
13. Shlyakhova G.V., Barannikova S.A., Zuev L.B., Kosinov D.A. Plastic strain localization in alloyed γ -Fe single crystals electrolytically saturated with hydrogen. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 8, pp. 37–42. (In Russ.).
14. Jones Robert, Catherine Wykes. *Holographic and Speckle Interferometry*. Cambridge University Press, 1983. (Russ.ed.: Jones R., Wykes C. *Golograficheskaya i spekl-interferometriya*. Moscow: Mir, 1986, 327 p.).
15. Zuev L.B., Gorbatenko V.V., Pavlichev K.V. Elaboration of speckle photography techniques for plastic flow analyses. *Measur. Sci. Technol.* 2010, vol. 21, no. 5, pp. 054014–054019.

Acknowledgements. The work was supported by the Program of Fundamental Research of the State Academy of Sciences in 2015 – 2020 yrs., the Tomsk State University Academic D.I. Mendeleev Fund Program in 2016 and the Russian Foundation for Basic Research (project no. 16-08-00385-a).

The authors express gratitude to M.V. Nadeschkin, A.G. Lunev and V.V. Gorbatenko for help with the experiments and discussion of the results.

Information about the authors:

S.A. Barannikova, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Assist. Professor, Leading Researcher (bsa@ispms.tsc.ru)

D.A. Kosinov, Engineer of the Chair of Physics named after V.M. Finkel (gromov@physics.sibsiu.ru)

L.B. Zuev, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Head of the Laboratory of Physics of Strength and Plasticity, Professor of the Chair “Theory of Strength and Designing” (lbz@ispms.tsc.ru)

V.E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Head of the Chair of Physics named after V.M. Finkel (gromov@physics.sibsiu.ru)

S.V. Kononov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Physics named after V.M. Finkel (kononov@physics.sibsiu.ru)

Received November 7, 2016

КИНЕТИКА МЕЖФАЗНОГО ПЕРЕХОДА СЕРЫ В ПРОЦЕССЕ КОВШЕВОГО РАФИНИРОВАНИЯ ЧУГУНА МАГНИЕМ

Руденко А.Л., к.т.н., старший научный сотрудник (ovoch-isi@yandex.ru)

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины
(49050, Украина, Днепропетровск, пл. академика Стародубова, 1)

Аннотация. В процессе внепечной обработки чугуна магнием в ковше образуется высокосернистый тугоплавкий гетерогенный шлак с высоким содержанием королек металла. Такие шлаки, в основном, кислые с различной окислительной способностью. Высокое содержание серы в шлаке повышает «опасность» обратного перехода серы из шлака в чугун. В работе экспериментальным путем изучена кинетика перехода серы через межфазную поверхность в системе металл–шлак. В качестве экспериментальных данных использовали результаты промышленных обработок чугуна магнием на заводах Китая. Моделирование межфазного перехода серы осуществлено с использованием теории пограничного диффузионного слоя. По упрощенному выражению для второго закона Фика определены значения коэффициентов массопереноса серы в шлаке. С использованием полученных кинетических характеристик расчетным путем доказано, что в конкретных производственных условиях после рафинирования чугуна магнием идет интенсивный возврат серы из шлака в корольки металла. При этом расчетное содержание серы в чугуне в ковше остается практически неизменным, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Ключевые слова: десульфурация, диффузия, шлак, межфазный переход, корольки, пограничный слой, массоперенос, фракция, удельная поверхность, коэффициент распределения.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-896-902

В настоящее время все более заметным становится интерес к использованию магния в качестве десульфуратора чугуна при внепечной обработке. Таким путем получают металл с ультранизким содержанием серы и небольшим количеством шлака в ковше; как следствие, в таких сталях наблюдаются высокие концентрации серы и металлических королек. Соответственно, возникает риск обратного перехода серы из шлака в металл.

Многолетняя практика показывает, что в промышленных условиях при транспортировке ковша в сталеплавильные цеха повышения концентрации серы в чугуне не происходит [1]. Однако о возможности развития процесса ресульфурации свидетельствует быстрый и существенный переход серы из шлака в корольки металла в промышленных условиях [2], а также при лабораторных исследованиях [3].

Среди исследователей нет единого мнения о механизме процесса ресульфурации при рафинировании чугуна магнием. Авторы работы [4] объясняют отсутствие ресульфурации в промышленных условиях низкой реакционной способностью шлаков. В работе [5] изучено явление «блокирования» процесса ресульфурации наличием в чугуне остаточного магния. Ряд работ посвящен объяснению механизма процесса ресульфурации [6, 7]. Однако все эти работы построены на анализе влияния различных параметров на возможность возврата серы в металл при разложении или окислении сульфида магния. В реальных условиях после десульфурации чугуна магнием в ковшевых шлаках отсутст-

вует сульфид магния [2, 8]. В литературе достаточно мало работ, посвященных кинетике этого процесса, а данные о коэффициентах массопереноса серы в шлаке приводятся только для наиболее изученных доменных и сталеплавильных шлаков.

Целью настоящей работы является изучение кинетики межфазного перехода серы в металл из ковшевого шлака, образовавшегося в процессе внепечной обработки чугуна магнием.

В настоящей работе в качестве данных для анализа использованы результаты исследований обработки чугуна магнием на заводах Китая. Образцы чугуна и шлака с корольками отбирали через 5 мин после начала внепечной обработки металла магнием. В течение этого времени существенное количество серы переходит в корольки металла.

С помощью химического анализа определяли содержания элементов в металлической и шлаковой фазах. Для всех рассмотренных экспериментов ($i = 1 \div 11$) известны данные о массе чугуна в ковше ($Q_{мет}$), концентрации шлака с корольками ($W_{шл1, кор}$) и концентрации королек в шлаке ($W_{кор}$). Извлеченные из шлака корольки разделяли на шесть фракций ($j = 1 \div 6$). В ходе работы определяли содержание каждой фракции королек в шлаке, а также химический состав королек. Детальное описание промышленных исследований и полученных результатов приведено в работе [9].

Для описания процессов, проходящих на границе раздела фаз, применили двухплечную теорию массо-

передачи, разработанную Льюисом и Уитменом [10]. Согласно этой теории скорость установления равновесия на межфазной поверхности (между двумя пограничными слоями) принимается большей, чем скорость массопереноса в объеме фазы. Следовательно, отношение концентраций серы по обе стороны от границы раздела фаз равно равновесному коэффициенту распределения (L_S) (рис. 1), где $\delta_{мет}$ и $\delta_{шл}$ – толщина пограничного слоя металла и шлака; $[S]$ и (S) – концентрация серы в металле и шлаке; $[S]_{мет/шл}$ и $(S)_{шл/мет}$ – концентрация серы на поверхности раздела металл–шлак в металле и шлаке; $\Delta[S] = [S]_{мет/шл} - [S]$, $\Delta(S) = (S) - (S)_{шл/мет}$ – перепад концентраций в металлическом и шлаковом пограничном слое; $L_S = (S)/[S]$ – фактический коэффициент распределения серы; $L_S^0 = \frac{(S)_{шл/мет}^0}{[S]_{мет/шл}^0}$ – коэффициент распределения (близкий к равновесному) серы на поверхности раздела шлак–металл.

Принято считать, что движущей силой в каждом звене является разность концентраций (ΔC_i) диффундирующего (реагирующего) вещества на входе в данное звено и на выходе из него, а скорость в любом звене зависит от площади диффузионной или реакционной поверхности S_i . В условиях металлургических агрегатов при высоких температурах лимитирующим звеном скорости гетерогенных процессов является диффузия серы из объема шлака к поверхности шлак–металл [11, 12].

Скорость изменения концентрации вещества i , используемую в любой форме [13], можно описать упрощенным выражением второго закона Фика:

$$\frac{dC_i}{d\tau} = \frac{dQ_i}{d\tau} \frac{1}{V} = \frac{D}{\delta} (C_{пов, i} - C_i) \frac{S}{V}, \quad (1)$$

где C_i и $C_{пов, i}$ – концентрация вещества i в объеме фазы и на границе с другой фазой, кг·моль/м³; τ – время диффузии в направлении x , с; Q_i – масса вещества i , кг·моль; V – объем вещества, м³; D – коэффициент молекулярной диффузии, м²/с; δ – толщина пограничного слоя, м;

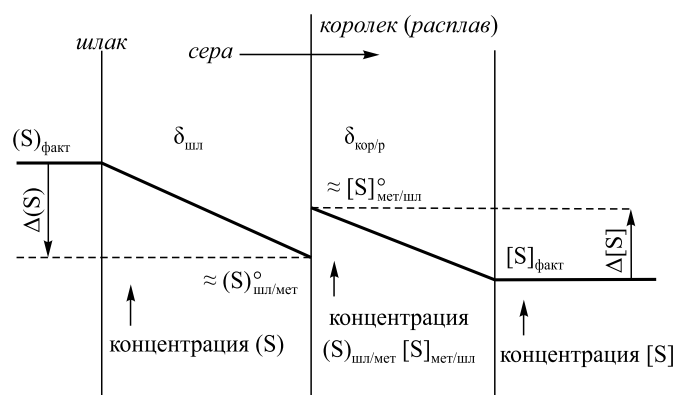


Рис. 1. Схема перехода серы в королёк или расплав чугуна

Fig. 1. Diagram of the transition of sulfur into the prills or into the molten iron

S/V – «геометрическое» отношение, м²/м³ = 1/м; S – площадь поверхности контакта фаз, перпендикулярной к направлению диффузионного потока, м².

Для перехода от «геометрического» отношения к удельной поверхности шлака ($S_{у.п.шл}$, м²/(т шлака)) в уравнении (1) умножаем знаменатель и числитель на плотность шлакового расплава ($\rho_{шл}$, т/м³) и получаем выражение

$$V_{S, шл} = \beta_{(S)} (C_{(S)_{пов}} - C_{(S)}) \frac{S_{шл, кор} \rho_{шл}}{V_{шл} \rho_{шл}}, \quad (2)$$

где $\beta_{(S)} = D/\delta$ – коэффициент массопереноса (массопередачи) вещества i , м/с; $S_{шл, кор}$ – площадь поверхности контакта раздела шлак–корольки, м²; $V_{шл}$ – объем шлака, м³.

Следовательно, уравнение (2) можно представить в следующем виде:

$$V_{S, шл} = K_{1, шл} (C_{(S)_{пов}} - C_{(S)}) S_{у.п. шл},$$

где $\beta_{(S)} \rho_{шл} = K_{1, шл}$ – коэффициент пропорциональности скорости диффузии серы в шлаковом пограничном слое, т шлака/(м²·с).

По аналогии с диффузией серы в шлаке для диффузии серы через пограничный слой в корольках получим:

$$V_{S, кор} = K_{2, кор} (C_{[S]_{пов}} - C_{[S]}) S_{у.п. кор},$$

где $K_{2, кор}$ – коэффициент пропорциональности скорости диффузии серы в корольках, т/(м²·с).

Рассмотрим стационарный процесс диффузии серы в шлаке и металле, при котором скорости в обоих звеньях будут одинаковы, поскольку лимитируются самым медленным звеном [14, 15]:

$$V_S = \frac{d[S]}{d\tau} = V_{S, шл} = V_{S, кор}.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} V_S &= \frac{d[S]}{d\tau} = K_{1, шл} ((S) - (S)_{шл/кор}^0) S_{у.п. шл} = \\ &= K_{2, кор} ([S]_{кор/шл}^0 - [S]) S_{у.п. кор}. \end{aligned}$$

Значение $S_{у.п. шл}$ сложно определить расчетным путем, а поскольку удельная поверхность шлаковой фазы, контактирующей с корольками, равна удельной поверхности этих корольков, заменим $S_{у.п. шл}$ на $S_{у.п. кор}$ и получим:

$$S_{у.п., шл} Q_{шл} = S_{у.п., кор} Q_{кор}.$$

Следовательно,

$$S_{у.п. шл} = S_{у.п. кор} \frac{Q_{кор}}{Q_{шл}}, \quad (3)$$

или в общем виде

$$n = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{шл}}}.$$

Тогда

$$S_{\text{у.п., шл}} = S_{\text{у.п., кор}} n, \quad (4)$$

где $Q_{\text{кор}}$ и $Q_{\text{шл}}$ – масса корольков и шлака.

Тогда коэффициент пропорциональности преобразуется к виду

$$K'_{1, \text{шл}} = \beta_{(S)} \rho_{\text{шл}} n. \quad (5)$$

Преобразуем уравнение (3) с помощью формул (4) и (5):

$$\begin{aligned} V_S &= \frac{d[S]}{d\tau} = K'_{1, \text{шл}} \left((S) - (S)_{\text{шл/кор}}^0 \right) S_{\text{у.п. кор}} = \\ &= K_{2, \text{кор}} \left([S]_{\text{кор/шл}}^0 - [S] \right) S_{\text{у.п. кор}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для того, чтобы в уравнении (6) избавиться от одного неизвестного, используем выражение для коэффициента распределения серы между шлаком и металлом, который, как было установлено выше, приближается к равновесному значению $L_S^0 = \frac{(S)}{[S]}^0$. Тогда уравнение (6) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} V_S &= K'_{1, \text{шл}} \left((S) - (S)_{\text{шл/кор}}^0 \right) S_{\text{у.п. кор}} = \\ &= K_{2, \text{кор}} \left(\frac{[S]_{\text{кор/шл}}^0}{L_S^0} - [S] \right) S_{\text{у.п. кор}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Из уравнения (7) находим:

$$(S)_{\text{шл/кор}}^0 = \frac{L_S^0 \left((S) + \frac{K'_{2, \text{кор}}}{K'_{1, \text{шл}}} [S] \right)}{\frac{K'_{2, \text{кор}}}{K'_{1, \text{шл}}} + L_S^0}.$$

Подставив значение $(S)_{\text{шл/кор}}^0$ в уравнение (7), получим

$$V_S = \frac{K_{2, \text{кор}} \left((S) - L_S^0 [S] \right)}{\frac{K'_{2, \text{кор}}}{K'_{1, \text{шл}}} + L_S^0} S_{\text{у.п. кор}}.$$

Для вязких шлаков $\frac{K'_{2, \text{кор}}}{K'_{1, \text{шл}}} \gg L_S^0$, соответственно, значением L_S^0 можно пренебречь. Тогда скорость ресульфурации корольков описывается следующим уравнением:

$$V_S = K'_{1, \text{шл}} \left((S) - L_S^0 [S] \right) S_{\text{у.п. кор}}. \quad (8)$$

На основе баланса серы в системе получаем значение одной переменной:

$$(S) = (S)_{\text{нач}} - ([S] - [S]_{\text{нач}}) n, \quad (9)$$

где (S) и $[S]$ – концентрация серы в шлаке и металле в момент τ .

Подставив выражение (9) в формулу (8) и проведя несложные преобразования, получим:

$$\begin{aligned} V_S &= \frac{d[S]}{d\tau} = K'_{1, \text{шл}} S_{\text{у.п. кор}} \left((S)_{\text{нач}} + [S]_{\text{нач}} n \right) - \\ &- K'_{1, \text{шл}} S_{\text{у.п. кор}} \left(L_S^0 + n \right) [S]. \end{aligned} \quad (10)$$

При неизменных значениях $K'_{1, \text{шл}}$, $S_{\text{у.п. кор}}$, $(S)_{\text{нач}}$, $[S]_{\text{нач}}$, n уравнение (10) с помощью констант $C_1 = K'_{1, \text{шл}} S_{\text{у.п. кор}} \times ((S)_{\text{нач}} + [S]_{\text{нач}} n)$ и $C_2 = K'_{1, \text{шл}} S_{\text{у.п. кор}} (L_S^0 + n)$ можно упростить: $\frac{d[S]}{d\tau} = C_1 - C_2 [S]$.

Дальнейшие преобразования позволяют получить следующее уравнение:

$$\frac{d[S]}{C_1 - C_2 [S]} = d\tau,$$

которое с помощью замены переменных и дальнейшего интегрирования преобразуется в равенство

$$\ln(C_1 - C_2 [S]) \Big|_{C_1 - C_2 [S]_{\text{нач}}}^{C_1 - C_2 [S]} = -C_2 \tau_0^{\tau}.$$

При потенцировании логарифмического уравнения находим значение серы в металле через время τ :

$$[S] = \frac{C_1}{C_2} - \left(\frac{C_1}{C_2} - [S]_{\text{нач}} \right) e^{-C_2 \tau}. \quad (11)$$

При описании межфазного перехода серы учитывали существенный разбег промышленных данных о количестве ковшевого шлака, содержании корольков в шлаке, а также концентрации серы в корольках и чугуне: было предложено суммировать и затем усреднять все экспериментальные данные. В таблице приведены основные параметры для различных фракций корольков для всех серий экспериментов.

С использованием данных о массе всех корольков ($Q_{\Sigma \text{кор}} = \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^{11} Q_{\text{кор}i} = 3,1098 \text{ т}$) и количестве растворенной в них серы ($Q_{\Sigma S \text{кор}} = \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^{11} Q_{S \text{кор}i} = 0,0279 \text{ т}$) определили усредненное значение содержания серы в корольках: $[S] = \left(\frac{Q_{\Sigma S \text{кор}}}{Q_{\Sigma \text{кор}}} \right) \cdot 100 \% = 0,8986 \%$. Это значение

соответствует содержанию серы в корольках через 5 мин после окончания десульфурации чугуна магнием.

Источником корольков в шлаке является ковшевой чугун. Следовательно, в начале эксперимента чугун

Основные параметры фракций королек
Main parameters of the prills fractions

Параметры королек	Фракция						Сумма
	j_1 $d = 0,14$ мм	j_2 $d = 0,57$ мм	j_3 $d = 1,5$ мм	j_4 $d = 2,5$ мм	j_5 $d = 4,0$ мм	j_6 $d = 5,0$ мм	
Масса королек 11-ти опытов $\sum_{i=1}^{11} Q_{кор,i}$, т	0,137	0,4563	0,6251	0,3393	0,4697	1,0824	$Q_{\Sigma кор} = \sum_{j=1}^6 \sum_{i=1}^{11} Q_{кор,i} = 3,1098$
Масса одного короля $Q_{кор,i} = V_{кор} \rho_{кор} \cdot 10^{-9}$	0,01034	0,69781	12,717	58,875	241,152	471	—
Количество королек $K_{кор,j} = \sum_{i=1}^{11} \frac{K_{кор,i}}{K_{кор,j}}$, 10^{-9} , т	13,2485	0,65390	0,049155	0,005763	0,001948	0,002298	$K_{\Sigma кор} = \sum_{j=1}^6 K_{кор,j} = 13,9616 \cdot 10^9$
Количественная доля королек $W_{кор,i} = \frac{K_{кор,фр}}{K_{\Sigma кор, фр}}$	0,94892	0,04684	0,003521	0,000413	0,0001395	0,0001646	1
Составляющая доля каждой фракции в определении среднего диаметра короля $d_{кор} = W_{кол} d_i$, мм	0,13285	0,0267	0,005282	0,00132	0,000558	0,000823	Среднее значение: $d_{кор} = 0,16724$ мм; $r_{кор} = 0,0836$ мм
Удельная поверхность королек (диаметр королек в мм) $S_{y.п.,j} = \frac{6\pi d_{кор}^2 10^3}{\pi d_{кор}^3} = \frac{6 \cdot 10^3}{d_{кор} \rho_{кор}}$, м ² /т	167	208	333	555	1462	5952	—
Массовая доля королек $W_{1мас} = \sum_{i=1}^{11} \frac{Q_{кор,i}}{Q_{\Sigma кор}}$	0,0441	0,1467	0,20101	0,10911	0,15104	0,34806	—
Составляющая доля каждой фракции в определении среднего значения $S_{y.п., кор} W_{S_{y.п.,j}} = W_{мас} S_{y.п.,j}$, м ² /т	262,4832	214,4754	111,5606	36,3326	31,4161	58,1264	Среднее значение $S_{y.п., кор} = 714,4$

в ковше и корольки в шлаке имеют одинаковый состав. Экспериментальные данные свидетельствуют, что содержание серы в чугуна после десульфурации в течение пятиминутной выдержки остается практически постоянным. Соответственно, сразу после обработки содержание серы в чугуна $[S]_{\text{чуг}}$ и в корольках шлака $[S]_{\text{кор}}$ одинаково и равно 0,00902 %. Тогда опытная средняя скорость перехода серы в корольки за 5 мин составит:

$$V_S = \frac{\Delta[S]}{\tau} = \frac{0,8986 - 0,00902}{300} = 296,533 \cdot 10^{-5} \%/\text{с}.$$

Принимаем, что такая скорость достигается в течение первых 2,5 мин, а данный временной интервал и является начальной точкой для дальнейших расчетов. Соответственно, и содержание серы в корольках в начале расчета будет составлять: $[S]_{\text{кор.нач}} = \frac{0,00902 + 0,8986}{2} =$

$= 0,45381$ %. В итоге часть серы перешла из шлака в корольки $\Delta[S] = 0,89856 - 0,45381 = 0,44479$ %. Это позволяет получить данные об общем количестве серы, которое убыло из шлака и прибавилось в корольках:

$$Q_{\Delta S_{\text{нач}}} = \frac{\Delta S_{\text{кор}}}{100 \%} Q_{S_{\text{кор}}} = 0,013832 \text{ т}.$$

Используя данные о суммарном количестве серы в шлаке после выдержки системы $Q_{S, S_{\text{шл}}} = \sum_{i=1}^{11} Q_{S_{\text{шл}i}} = 399,683 \cdot 10^{-4}$ т, рассчитаем массу серы в шлаке в начальной точке (до перехода в корольки): $Q_{S(S)_i} = Q_{S(S)} + Q_{\Delta S_i} = 0,0538$ т. Следовательно, концентрация серы в шлаке в данный момент времени составит

$$(S)_{\text{нач}} = \frac{Q_{S(S)_{\text{нач}}}}{Q_{S(S)} + Q_{\Delta S_{\text{нач}}}} \cdot 100 \% = 0,76156 \ \%.$$

Используя уравнение (8), получим:

$$K'_{I, \text{шл}} = \frac{V_{\text{кор}}}{S_{\text{у.п. кор}} \left((S)_{\text{нач}} - L_S^0 [S]_{\text{нач}} \right)} = 0,05723 \cdot 10^{-5}.$$

Для расчета коэффициента массопереноса серы $(\beta_{(S)})$ в шлаке воспользуемся уравнением (5):

$$\beta_{(S)} = \frac{K_{\text{шл}}}{\rho_{\text{шл}} n} = 0,36274 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}.$$

При определении значения n учли изменения массы корольков и шлака, связанные с переходом серы из шлака в корольки.

Используя данные таблицы, определим значения констант C_1 и C_2 . Для определения концентрации серы в корольках при различном времени выдержки (τ) в уравнение (11) подставляем значения констант C_1 и C_2 .

Результаты расчета за разные промежутки времени представлены на рис. 2.

Рассмотрим систему шлак–металл. С увеличением слоя шлака (контактирующей фазы) коэффициент диффузии серы (β_S) уменьшается. Как в системе металл–шлак, так и в системе королек–шлак шлак общий, а значит, значение коэффициента диффузии D одинаково. Следовательно, в соответствии с уравнени-

ем $\beta_S = D/\delta$ будет увеличиваться толщина пограничного шлакового слоя. Поэтому при использовании вышеприведенной методики для расчета распределения серы между шлаком и чугуном в ковше необходимо учитывать существенные различия в толщине шлакового слоя над корольками (h) и металлом ковша (H).

Базируясь на данных об объеме шлака с корольками и количестве корольков в шлаке, рассчитаем значение условного радиуса королька со шлаком ($r_{\text{к.шл}} = 0,3447$ мм). С учетом данных о радиусе одиночного королька (см. таблицу) $h = 0,2611$ мм. Для определения толщины слоя шлака над чугуном воспользуемся данными о внутреннем диаметре ковша в верхней части, а также массе шлака и корольков. Полученное соотношение $H/h \approx 2000$ показывает, что путь диффузии серы через шлак к королькам будет на три порядка короче, чем к зеркалу металла ковша. Следовательно, условная толщина пограничного слоя в шлаке над чугуном в ковше должна увеличиться в три раза, а коэффициент массопереноса серы в шлаке $(\beta_{(S)})$ над чугуном примет значение $0,36274 \cdot 10^{-8}$ м/с.

По аналогичной методике определено изменение содержания серы в чугуна ковша за разный промежуток времени, данные приведены ниже:

Продолжительность, мин	Концентрация серы в чугуна, %
0	0,00902
3	0,00903
5	0,00904
8	0,00906
10	0,00906
15	0,00909
20	0,00911

Изменения концентрации серы в чугуна практически не наблюдается, оно соизмеримо с погрешностью

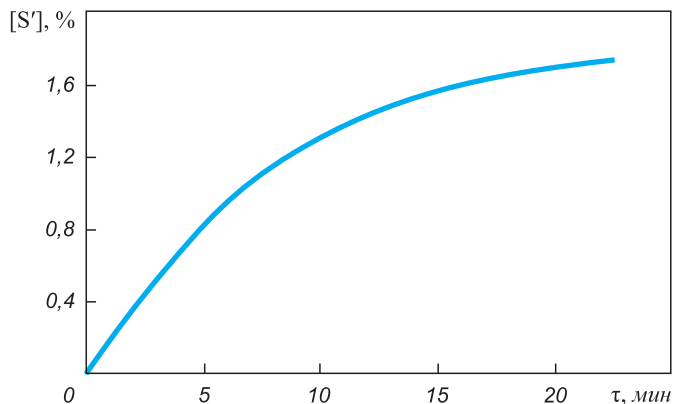


Рис. 2. Влияние времени контакта шлака с корольками на концентрацию серы в них

Fig. 2. Effect of time of slag and prills contact on the concentration of sulfur in them

химического анализа проб металла. Дальнейшие расчеты показывают, что в течение 110,5 мин концентрация серы в чугуна постоянна и составляет 0,009 %.

Выводы. Предложена методика расчета кинетических характеристик (показателей) межфазного перехода серы в процессе внепечного рафинирования магнием. В основе данной методики лежит двухплеченная теория массопередачи. В качестве экспериментальных данных использованы промышленные результаты внепечной обработки чугуна, в процессе которой формируется ковшевой шлак с высоким содержанием серы и королек металла. Для определения кинетических констант (характеристик) процесса использованы экспериментальные данные об изменении концентрации серы в металле, шлаке и корольках металла во времени. Для условий выдержки жидкого чугуна под шлаком выполнено теоретическое обоснование корректировки значения толщины пограничного слоя шлака. Кинетические характеристики, полученные с использованием этой модели, хорошо согласуются с промышленными результатами. Подтверждено, что после десульфурации чугуна магнием при данных условиях наблюдается быстрый переход серы из шлака в корольки металла. Расчетное содержание серы в чугуна ковша остается практически неизменным в течение двухчасовой выдержки системы металл–шлак. Полученные результаты свидетельствуют о том, что лимитирующим звеном процесса ресульфурации является диффузия серы в шлаке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воронова Н.А. Десульфурация чугуна магнием. – М.: Металлургия, 1980. – 239 с.
2. Sulfur Distribution Features in Metal-Slag-Gas System during Hot Metal Desulfurization with Magnesium. Proceed. of the 7 Intern. Conf. MMT – 2012. Ariel University Center of Samaria. Israel. August 20 – 23. 2012, P. 120 – 129.
3. Чубин К.И. Развитие теории и совершенствование технологии десульфурации чугуна вдуванием диспергированного магния // Автореф. ... дисс. канд. техн. наук. – Днепропетровск, 2008. – 22 с.
4. Ткач Н.Т., Шевченко А.Ф., Костицын Д.В., Лындя П.С. Особенности шлакообразования в ковшах с жидким чугуном // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. 2004. № 8. С. 168 – 175.
5. Курилова Л.П., Булахтин А.С., Кисляков В.Г. и др. О ресульфурации чугуна от выпуска из доменной печи до слива в конвертер // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. 2010. № 22. С. 96 – 105.
6. Mechanism of Resulfurization in Magnesium Desulfurization Process of Molten Iron. ISIJ International. 2005. Vol. 45. No 11. P. 1607 – 1615.
7. Prevention of Resulfurization in Desulfurization Process with Magnesium Vapor Produced in Situ Aluminothermic Reduction of Magnesium Oxide. ISIJ International. 2005. Vol. 45. No 12. P. 1795 – 1803.
8. Вергун А.С., Шевченко А.Ф., Кисляков В.Г., Руденко А.Л. Роль ковшевого шлака при десульфурации чугуна магнием // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. 2009. № 20. С. 80 – 85.
9. Вергун А.С., Приходько Э.В., Кисляков В.Г. Влияние химического состава и свойств ковшевого шлака, формирующегося в процессе десульфурации чугуна магнием, на содержание в нем металлической фазы // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. 2010. № 21. С. 117 – 127.
10. Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. – М.: Металлургия, 1974. – 496 с.
11. Есин О.А., Гельд П.В. Физическая химия пирометаллургических процессов. Ч. 2. – М.: Металлургия, 1966. – 703 с.
12. Попель С.И., Сотников А.И., Бороненков В.Н. Теория металлургических процессов. Учебное пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1986. – 463 с.
13. Туркдоган Е.Т. Физическая химия высокотемпературных процессов / Пер. с англ. Ю.И. Уточкина, В.И. Симонова. – М.: Металлургия, 1985. – 344 с.
14. Теория металлургических процессов. Учебное пособие для вузов / Д.Н. Рыжонков, П.П. Арсентьев и др. – М.: Металлургия, 1989. – 392 с.
15. Меджибожский М.Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. – Киев – Донецк: Вища школа, 1986. – 280 с.

Поступила 28 сентября 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 12, pp. 896–902.

KINETICS OF INTERFACIAL TRANSITION OF SULFUR DURING LADLE REFINING OF IRON BY MAGNESIUM

A.L. Rudenko

Z.I. Nekrasov Institute of Ferrous Metallurgy, Ukrainian National Academy, Dnepropetrovsk, Ukraine

Abstract. During magnesium desulfurization of molten iron, high – sulfur and heterogeneous slag with high content of prills is formed in the ladle. Generally these slags are sour with various oxidizing ability. The high content of sulfur in the slag increases the “danger” of the reversion of sulfur from the slag to the melt. In this paper the kinetics of sulfur transfer through the metal – slag interface surface was examined. The results of hot metal treatment with magnesium in the factories in China were used as a basis for experimental data. The interfacial transfer of sulfur was modeled using diffusion boundary layer theory. The coefficient values of sulfur mass transfer in the slag were deter-

mined using a simplified expression of the second Fick’s law. While using these kinetic characteristics during calculations, it was proved that after refining of hot metal with magnesium under present conditions, a fast return of the sulfur from the slag into the metal droplets takes place. At the same time the estimated sulfur content in the iron in the ladle remains practically invariable.

Keywords: desulfurization, diffusion, slag, interfacial transfer.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-896-902

REFERENCES

1. Voronova N.A. *Desulfurization of cast-iron with magnesium* [Cast-iron desulfurization with magnesium]. Moscow: Metallurgiya, 1980, p. (In Russ.).

2. Sulfur Distribution Features in Metal-Slag-Gas System during Hot Metal Desulfurisation with Magnesium. *Proceed. of the 7 Int. Conf. MMT – 2012. Ariel University Center of Samaria, Israel. August 20–23. 2012*, P. 120–129.
3. Chubin K.I. *Razvitie teorii i sovershenstvovanie tekhnologii desul'furatsii chuguna vduvaniem dispergirovannogo magniya: Avtoref. ... diss. kand. tekhn. nauk* [Theory development and technology improvement of cast iron desulfurization with the injection of dispersed magnesium: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Dneprodzerzhinsk, 2008, 22 p. (In Russ.).
4. Tkach N.T., Shevchenko A.F., Kostitsyn D.V., Lyndya P.S. Peculiarities of slag formation in ladles with liquid cast iron. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metallurgii*. 2004, no. 8, pp. 168–175. (In Russ.).
5. Kurilova L.P., Bulakhtin A.S., Kislyakov V.G., Rudenko A.L., Tkach N.T. On cast iron resulfurization from the output from blast furnace to the drain into the converter. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metallurgii*. 2010, no. 22, pp. 96–105. (In Russ.).
6. Mechanism of Resulfurization in Magnesium Desulfurization Process of Molten Iron. *ISIJ International*. 2005, vol. 45, no. 11, pp. 1607–1615.
7. Prevention of Resulfurization in Desulfurisation Process with Magnesium Vapor Produced in Situ Aluminothermic Reduction of Magnesium Oxide. *ISIJ International*. 2005, vol. 45, no. 12, pp. 1795–1803.
8. Vergun A.S., Shevchenko A.F., Kislyakov V.G., Rudenko A.L. Role of ladle slag at cast-iron desulfurization with magnesium. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metallurgii*. 2009, no. 20, pp. 80–85. (In Russ.).
9. Vergun A.S., Prikhod'ko E.V., Kislyakov V.G. Influence of chemical composition and the properties of ladle slag, formed in the process of desulfurization of cast-iron with magnesium, on the content of metal phase in them. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metallurgii*. 2010, no. 21, pp. 117–127. (In Russ.).
10. Yavoiskii V.I., Dorofeev G.A., Povkh I.L. etc. *Teoriya produvki staleplavil'noi vannы* [Theory of steelmaking bath blowing]. Moscow: Metallurgiya, 1974, 496 p. (In Russ.).
11. Esin O.A., Gel'd P.V. *Fizicheskaya khimiya pirometallurgicheskikh protsessov. Ch. 2* [Physical chemistry of pyrometallurgical processes. Part 2]. Moscow: Metallurgiya, 1966, 703 p. (In Russ.).
12. Popel' S.I., Sotnikov A.I., Boronenkov V.N. *Teoriya metallurgicheskikh protsessov. Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Theory of metallurgical processes. Textbook for universities]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 463 p. (In Russ.).
13. Turkdogan E.T. *Physical chemistry of high-temperature processes*. Academic Press, 1980, 447 p. (Russ. ed. Turkdogan E.T. *Fizicheskaya khimiya vysokotemperaturnykh protsessov*. Moscow: Metallurgiya, 1985, 344 p.).
14. Ryzhonkov D.N., Arsent'ev P.P. etc. *Teoriya metallurgicheskikh protsessov. Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Theory of metallurgical processes. Tutorial for universities]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 392 p. (In Russ.).
15. Medzhibozhskii M.Ya. *Osnovy termodinamiki i kinetiki staleplavil'nykh protsessov* [Basics of thermodynamics and kinetics of steel-making processes]. Kiev – Donetsk: Vishcha shkola, 1986, 280 p. (In Russ.).

Information about the author:

A.L. Rudenko, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher
(ovoch-isi@yandex.ru)

Received September 28, 2016

УДК 621.181

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ АУСТЕНИТНОЙ ХРОМОМАНГАНЦЕВОЙ ЖАРОПРОЧНОЙ СТАЛИ*

*Любимова Л.Л., к.т.н., доцент, доцент кафедры «Парогенераторостроение
и парогенераторные установки» (l11@tpu.ru)*

Макеев А.А., к.т.н., доцент

*Заворин А.С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Парогенераторостроение
и парогенераторные установки» (zavorin@tpu.ru)*

*Ташлыков А.А., к.т.н., доцент кафедры «Парогенераторостроение
и парогенераторные установки» (tashlykov@tpu.ru)*

**Национальный исследовательский Томский политехнический университет
(634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30)**

Аннотация. Реализованы подходы к диагностике зарождения и развития повреждаемости стали энергетического оборудования на микро- и субмикроуровне, что требует учета специальных параметров, отражающих индивидуальные свойства материала, и введения в анализ процессов, протекающих в элементах оборудования, параметров субструктуры. К таким параметрам отнесены период кристаллической решетки и внутренние структурные напряжения I и II рода. Приведены результаты оценки напряженного состояния при упруго-пластическом деформировании аустенитной хромоманганцевой стали. Показано, что процесс циклического деформирования сопровождается осцилляцией внутренних напряжений в области работоспособных состояний, лимитированной кривыми упрочнения – разупрочнения. Результаты проанализированы с точки зрения установления характерных признаков предразрушения. Приведен комплекс отличительных признаков и параметр материала, ниже которого трещины в области деформаций между линией упрочнения и разупрочнения не активны. Представлены результаты металлографических исследований поврежденного металла, совпадающие с выводами рентгенодиагностики.

Ключевые слова: сталь, период кристаллической решетки, упруго-пластическое деформирование, внутренние структурные напряжения I и II рода, релаксация, разрушение.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-903-909

Проблема диагностики зарождения, накопления и развития повреждаемости стали энергетического оборудования на микро- и субмикроуровне занимает особое место в вопросах надежности. Для анализа такого физического состояния требуется вводить параметры структуры, которые позволили бы на микроуровне реализовывать подходы к оценкам внутренних структурных резервов материала. Используя совокупность характеристик макро- и микроуровня, можно расширить представления о факторах и механизме разрушения и тем самым определить условия эксплуатации, продляющие срок службы оборудования [1].

Между долговечностью трубных элементов при повышенных температурах в условиях ползучести и параметрами структуры отмечена определенная связь: $\tau = \varphi(t, \sigma, d)$, где время до разрушения τ (долговечность) определяется температурой t , размером зерна d и уровнем напряжения σ . Предпринимаются также попытки теоретически отразить влияние внутренних структур-

ных напряжений на прочностные характеристики и ресурс, например, математическое описание участка установившейся ползучести [2]. При этом значения внутренних напряжений закладываются в выражение для кривой ползучести в виде некоторой константы. Однако в неоднородных поликристаллических материалах, применяемых в энергомашиностроении в качестве конструкционных, в течение всего срока службы протекают структурно-фазовые превращения [3], которые приводят к возникновению осцилляций внутренних напряжений как первого (σ_I), так и второго рода (σ_{II}). Структурно-фазовые превращения являются причиной деградации материала, определяют его физические характеристики и влияют на индивидуальный ресурс. Это необходимо учитывать в виде специальных параметров, которые не остаются неизменными с изменением вида напряженного состояния объекта и отражают индивидуальные особенности материала. В настоящей работе к таким параметрам отнесены период кристаллической решетки и внутренние структурные напряжения I и II рода [4, 5].

В числе наиболее важных для ресурса и надежности поверхностей нагрева оборудования ТЭС и АЭС оста-

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований «Фундаментальные основы инженерных наук», проект № 15-08-99544а.

ется проблема хрупких разрушений даже пластичных материалов [6 – 9].

Одним из условий возникновения хрупкой трещины предполагается наличие изначально существующего «острого» дефекта, прорастающего в трещину при нагружении [10]. Однако острый дефект формы является фактором случайным, который может быть, а может и не быть в структуре материала.

Закономерными являются процессы преобразования полей внутренних напряжений и их неоднородная релаксация при знакопеременных термических и механических нагрузках. Их скрытое взаимодействие приводит к образованию микротрещин, а внутренние напряжения выступают, таким образом, постоянно действующим генератором собственного «острого» структурного дефекта.

Микротрещины возникают в металле постоянно. Однако на первый план выступает не столько сам факт их зарождения, сколько реализация условия роста трещины и признаков предразрушения.

Это определило цель настоящей работы, которая заключается в экспериментальном исследовании процесса перераспределения внутренних структурных напряжений при упруго-пластическом деформировании для установления состояния предразрушения по условиям релаксации внутренних напряжений.

В качестве материала для исследований выбрана перспективная для пароперегревателей котлов сверхкритических давлений жаропрочная аустенитная хромомарганцевая сталь Ди-59 (X13G12БСН2Д2). Химический состав по ГОСТ 5632 – 72: 0,07 % С; 1,99 % Ni; 12,45 % Cr; 13,0 % Mn; 0,21 % Si; 0,006 % S; 0,015 % P; 0,03 % Al; 2,15 % Cu; 0,79 % Nb; 0,015 % В; остальное железо (по массе).

К факторам эксплуатационного воздействия, влияющим на работоспособность трубопроводов, относятся длительно действующие циклически изменяющиеся

напряжения и деформации, возникающие при пусках, остановках, резких изменениях режимов, которые будут приводить к изменению структуры материала, его состояния и влиять на механические свойства и ресурс работоспособности. Поэтому методика испытаний сводилась к организации искусственного форсированного деформационного старения. Для этой цели опытный образец, изготовленный из трубы пароперегревателя, подвергали внешнему механическому циклическому нагружению с возрастающим давлением на образец P_i в каждом очередном цикле. Это позволяет получать и фиксировать структурные превращения, которые отсутствуют или медленно протекают при неизменном давлении [11, 12].

Технология получения труб весьма сложна, поэтому их поверхность проявляет анизотропию свойств, обусловленную гетерогенностью и несплошностью структуры. В качестве подтверждения этого положения в настоящей работе получено изменение микротвердости по толщине стенки трубы пароперегревателя (рис. 1, а). Видно, что на поверхности стенки микротвердость почти в два раза превышает таковую для внутренних структур, а сама стенка по уровню микротвердости обнаруживает несколько разнородных слоев микротвердостью от 4200 до 2500 МПа (рис. 1, а), которые впоследствии отчетливо проявляются другими средствами (рис. 1, б).

Практика эксплуатации показывает, что основная доля отказов в работе энергоблоков (от 50 до 90 %) связана с нетрадиционными бездеформационными разрушениями труб [1, 13], а разрушения пароперегревательных труб в котлоагрегатах часто наблюдаются с поверхности [13, 14].

Кроме этого, следует иметь в виду, что существуют две категории прочности – зерен и межзеренных границ (МЗГ), где механизмы деформационного старения могут быть различны. Построенный на теории

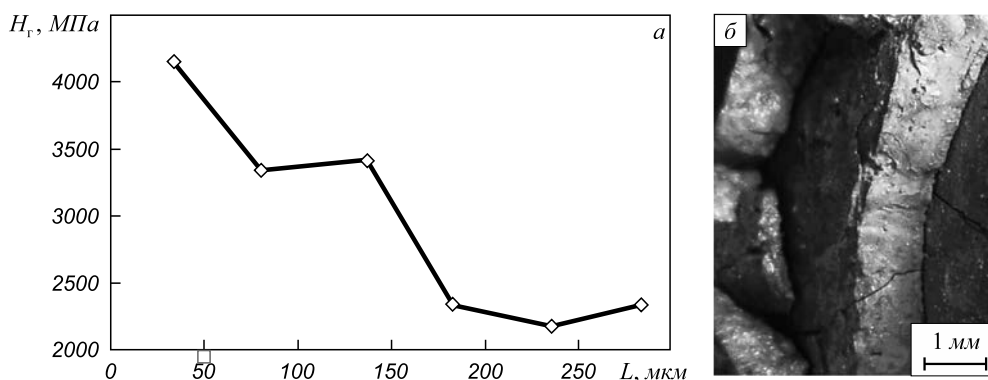


Рис. 1. Слоистая структура трубы:

а – изменение микротвердости по толщине стенки трубы (начало измерений – от наружной поверхности к внутренней); б – поверхность после глубокого окисления (отчетливо просматривается четыре характерных слоя)

Fig. 1. Layered structure of the tube:

а – changes of the microhardness along the tube wall thickness (start of measurement – from the outer surface to the inside one); б – the surface after deep oxidation (clearly visible four characteristic layers)

дислокаций механизм старения для внутризеренных структур не может быть применен для описания процессов в пределах границ зерен и фаз. В этой связи представляют интерес экспериментальные исследования по трансформации прочностных свойств зерен и МЗГ методом рентгеноструктурного анализа (РСА), способным дифференцировать внутри- и межзеренные напряжения в наиболее опасной поверхностной зоне (рис. 1, а).

Процесс трещинообразования связывают с явлением релаксации внутренних напряжений, приводящим к уменьшению локальных напряжений. Известно [15], что на границах зерен межатомные связи сильно напряжены, и когда межатомное расстояние увеличивается более чем на 10 – 15 %, связи следует считать разрушенными. Процесс разрыва межатомных связей является ведущим на всех стадиях разрушения [16]. Последствием разрушения межатомных связей является релаксация напряжений и трещинообразование [17]. В процессе возникновения и роста усталостных трещин происходит релаксация и перераспределение остаточных напряжений [18]. Наконец, из теории дифракции рентгеновских лучей следует, что физическое уширение рентгеновской дифракционной линии связано с перераспределением полей упругих напряжений: возрастание соответствует упрочнению, а уменьшение – зарождению микротрещин, так что образование микротрещин является релаксационным процессом, приводящим к уменьшению локальных напряжений [19]. Путем установления рентгеновских признаков и условий релаксации может быть решена задача о возможности распространения трещины.

Все эти обстоятельства требуют применения нетрадиционных методов и методик исследования, способных эффективно участвовать в решении перечисленных проблем. В настоящей работе для этих целей применен метод рентгеноструктурного анализа.

Методика рентгенодиагностики базируется на классической фундаментальной теории рентгеноструктурного анализа, согласно которой величина внутренних

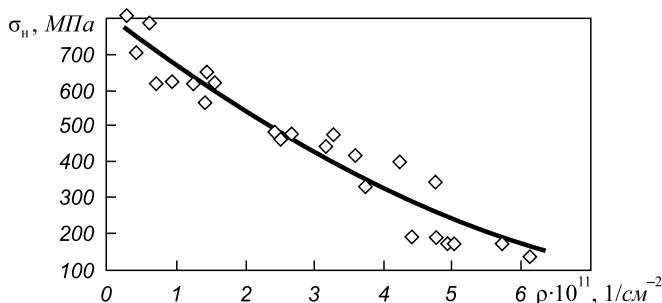


Рис. 2. Влияние внешнего циклического нагружения на распределение микронапряжений в зависимости от плотности дислокаций образца (внутренняя сторона стенки трубы)

Fig. 2. Effect of cyclic loading on the external distribution of microstrain depending on sample density of dislocations (inner side of the tube wall)

напряжений первого рода σ_I (зональных) и второго рода σ_{II} (микронапряжений) оценивается по выражениям:

$$\sigma_{II} = \left(\frac{n_2}{4 \tan \theta_2} \right) E; \quad \frac{\Delta a}{a} = \frac{\sigma_I}{E},$$

где n_2 – часть физического уширения дифракционной линии, обусловленного микронапряжениями; θ_2 – угол дифракции второй аналитической дифракционной линии; E – модуль нормальной упругости; a – параметр элементарной ячейки; $\Delta a/a$ – относительное изменение параметра элементарной ячейки a , характеризующее величину искажений.

Экспериментальные результаты представлены на рис. 2 – 4.

На рис. 2 показана зависимость внутренних структурных напряжений II рода σ_{II} (внутризеренных) от плотности ρ дислокаций при циклическом деформировании (точки на кривых соответствуют циклам нагружения).

В основу интерпретации полученных результатов (рис. 2) положены концепция и известная теоретическая кривая И.А. Одингга, которая отражает взаимосвязь между сопротивлением деформации (прочностью) и плотностью дислокаций. Согласно этой теории наибольшей прочностью и сопротивлением деформиро-

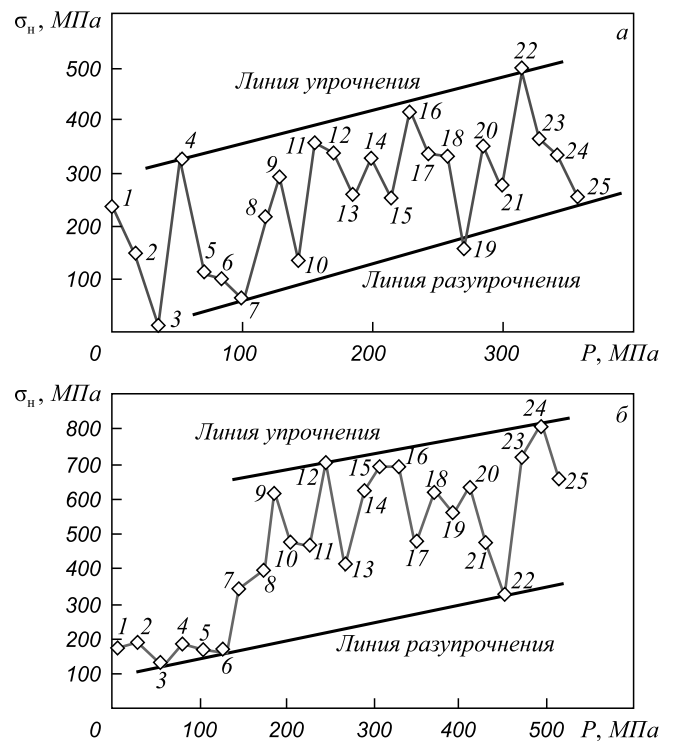


Рис. 3. Перераспределение микронапряжений второго рода в зависимости от внешнего циклического нагружения: а – наружная сторона трубы; б – внутренняя сторона трубы

Fig. 3. Redistribution of microstrain of the second kind depending on the external cyclic loading: а – outer side of the tube; б – inner side of the tube

ванию материал обладает при малой плотности дислокаций, так что при деформации он может быть хрупко разрушен прежде, чем дислокации обеспечат достаточные сдвиги. При увеличении плотности дислокаций уменьшается сопротивление деформированию.

Экспериментальная зависимость в осях внутренние напряжения – плотность дислокаций (рис. 2), а также ранее полученная в работе [20] зависимость привели к подтверждению вида кривой Одингга. Эти результаты показали, что процесс циклического деформирования сопровождается эффективным перераспределением внутренних напряжений величиной от 800 до 100 МПа, что закономерно определяется неоднородностью исходной структуры (рис. 1, а). Показано, что деформации протекают в соответствии с гипотезой Одингга, согласно которой однократная нагрузка может привести как к пластической релаксации напряжений, так и к их повышению. Сопоставление этой зависимости (рис. 2) с гипотетической кривой Одингга позволяет полагать, что внутренние напряжения являются датчиком любых структурных состояний, отражают индивидуальные особенности материала и его реальные прочностные характеристики. Следовательно, эту связь можно использовать в качестве параметра субструктуры для анализа процессов, протекающих в элементах конструкций, и оценок работоспособности.

На рис. 3 представлены зависимости микронапряжений второго рода σ_{II} от приложенного внешнего да-

вления (точками на кривых обозначены последовательные циклы нагружения).

Для обеих сторон трубы характер полученных зависимостей имеет общие признаки:

- циклическое нагружение вызывает ответное чередование процессов упрочнения и разупрочнения внутренних напряжений σ_{II} ;
- распределение напряжений при деформировании лимитируется областью, ограниченной линиями упрочнения-разупрочнения.

Результаты (рис. 3) свидетельствуют о наличии разницы прочностей зерен для разных поверхностей стенки трубы и могут указывать на вероятное направление разрушения. Отсутствие глубоких релаксаций напряжений (до нуля) в широком диапазоне внешних давлений показывает, что образующаяся микротрещина не распространяется за счет пластических релаксаций на острие трещины. Можно допустить, что исследуемый материал не обладает склонностью к хрупким разрушениям структурного зерна, если его состояние лимитируется определенной областью и не выходит за пределы допускаемых значений (рис. 3).

Перераспределение зональных напряжений σ_I представлено на рис. 4. Циклические нагрузки приводят к знакопеременным изменениям зональных напряжений от минимальных разупрочняющих (σ_{min}) до максимальных упрочняющих (σ_{max}), что позволяет установить поле безопасных напряжений, лимитируемых линиями упрочнения-разупрочнения.

Характерным процессом при деформировании также является релаксация внутренних напряжений, соответствующая процессу разупрочнения и характеризующая момент образования микроструктурно короткой трещины, которая может развиваться или останавливаться в своем развитии.

Распространение трещины может спровоцировать наступление предельного состояния, т.е. разрушение конструкции (отказ).

Причиной наступления опасного состояния является накопление внутренней энергии при деформировании образца, которая в очередном цикле нагружения уменьшается из-за разрыва межатомных связей, расходуется на продвижение трещины и проявляется глубокой релаксацией напряжений, что является критерием наступления опасного состояния. Тело (или элемент конструкции) находится в опасном состоянии, если такое состояние возникает в какой-либо одной его точке [21].

Опасное состояние характеризуется точками 8 (рис. 4, а) и 11 (рис. 4, б). Видно, что в точках 8 и 11 в очередном цикле нагружения начинается резкое падение сопротивления деформированию и глубокая, практически до нуля, релаксация напряжений, которая свидетельствует о разрывах межатомных связей и прорастании структурной трещины. Этот момент можно охарактеризовать системой следующих взаимно свя-

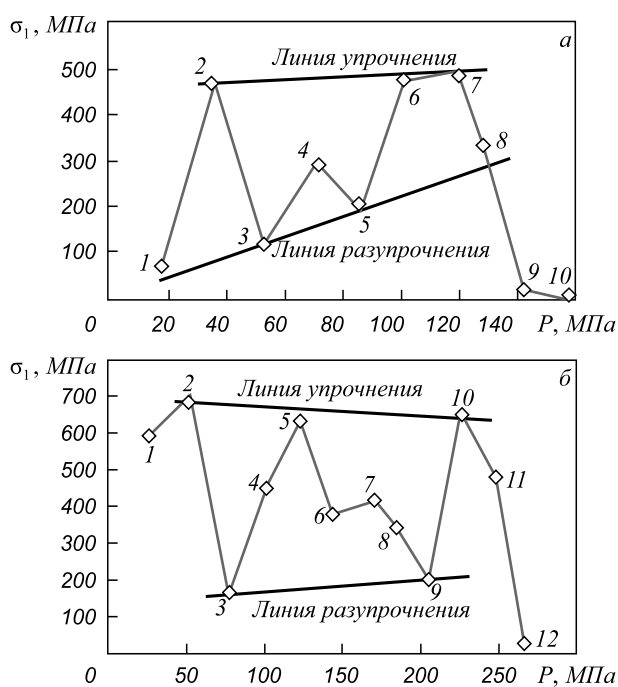


Рис. 4. Перераспределение зональных напряжений в зависимости от внешнего циклического нагружения:
а – наружная сторона трубы; б – внутренняя сторона трубы

Fig. 4. Redistribution of zonal voltages depending on the external cyclic loading:
а – outer side of the tube; б – inner side of the tube

занных признаков, в совокупности представляющих собой наступление состояния предразрушения:

- точка $(\sigma_1)_i$ при очередном цикле нагружения P_{i+1} характеризуется резким падением сопротивления деформированию, что проявляется глубокой релаксацией внутренних напряжений первого рода $(\sigma_1)_{i+1}$ (ниже линии разупрочнения или до нуля);
- точка $(\sigma_1)_i$, в которой наступает глубокая релаксация внутренних напряжений при очередном цикле нагружения P_{i+1} , должна находиться в поле безопасных напряжений;
- величина внутреннего напряжения $(\sigma_1)_i$ в точке, в которой наступает глубокая релаксация при очередном цикле нагружения P_{i+1} , должна меняться в сторону разупрочнения по отношению к предыдущему циклу $(\sigma_1)_{i-1}$;
- состояние материала в точке $(\sigma_1)_i$, в которой наступает глубокая релаксация внутренних напряжений при очередном цикле нагружения P_{i+1} , описывается определенным, характерным для данного материала значением отношения $(\sigma_1)_i/(\sigma_1)_{\max} = \Pi$, являющимся параметром материала, ниже которого трещины, возникающие в предыдущих циклах, не активны.

Действительно, для наружной поверхности (рис. 4, а) максимальные напряжения на линии упрочнения составляют $(\sigma_1)_{\max} = 492$ МПа. В точке 8 $(\sigma_1)_i/(\sigma_1)_{\max} = \Pi = 331/492 = 0,67$.

Для внутренней поверхности (рис. 4, б) достигаются максимальные напряжения $(\sigma_1)_{\max} = 694$ МПа. В точке 11 $(\sigma_1)_i/(\sigma_1)_{\max} = \Pi = 478/694 = 0,67$.

Можно полагать, что параметром для данного материала, ниже которого трещины, возникающие в предыдущих циклах, не активны, является величина

$$\Pi = (\sigma_1)_i/(\sigma_1)_{\max} \geq 0,67.$$

Ниже для сравнения приведены соотношения $\sigma_i/\sigma_{\max}$ для других точек наружной и внутренней поверхностей стенки трубы по данным, представленным на рис. 4.

Номер цикла	Наружная поверхность $\sigma_i/\sigma_{\max}$	Номер цикла	Внутренняя поверхность $\sigma_i/\sigma_{\max}$
Точка 3	108/492 = 0,22	Точка 3	165/694 = 0,23
Точка 4	290/492 = 0,59	Точка 4	450/694 = 0,64
Точка 5	205/492 = 0,42	Точка 6	381/694 = 0,55
Точка 11	256/492 = 0,52	Точка 7	410/694 = 0,59
Точка 13	233/492 = 0,47	Точка 8	342/694 = 0,49
Точка 23	210/492 = 0,43	Точка 9	205/694 = 0,30

Можно видеть, что соотношение $\sigma_i/\sigma_{\max}$, кроме точек 8 (рис. 4, а) и 11 (рис. 4, б), нигде более не достигает значения более 0,67.

Глубокая релаксация напряжений по границам зерен (рис. 4) и отсутствие ее внутри зерен (рис. 3) свидетельствуют о постадийности процесса разрушения, которое для этой стали начинается с границ зерен. Кроме того, на основании рис. 4 можно заключить, что процессу структурной деградации в первую очередь подвержена наружная поверхность стенки трубы как менее структурно устойчивая. Так, на наружной поверхности релаксация достигается при внешнем воздействии 130 МПа, а разрушение внутренней поверхности происходит при давлении порядка 250 МПа.

Этот же вывод вытекает из проведенных металлографических исследований разрушенных труб IV ступени пароперегревателя из стали Ди-59 котла БКЗ 210-140 Ф с наработкой 6821 ч и числом пусков – 17 (рис. 5). Микроструктуру стали определяли на микроскопе Метам ЛВ-32.

Разрушенные поверхности пароперегревателя не несли следов отложений и окалины, не обнаружено

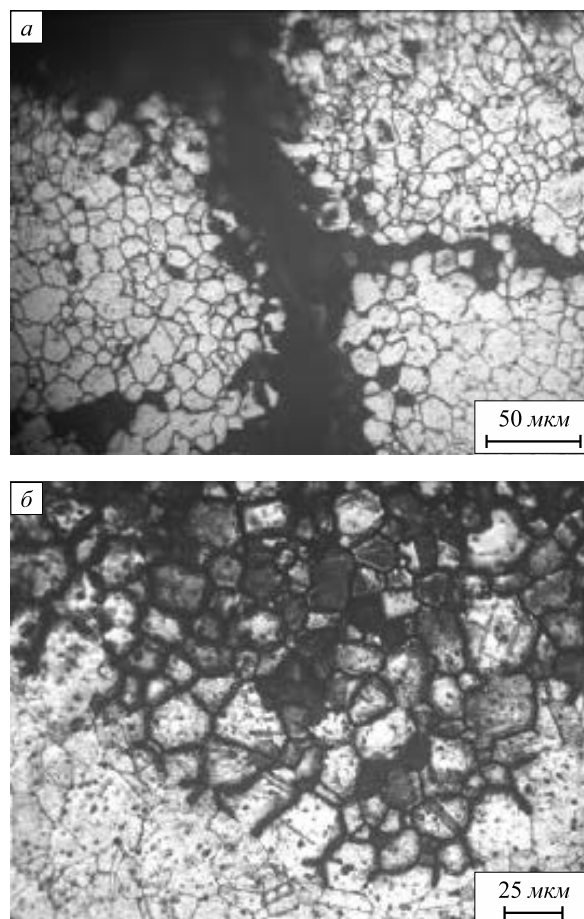


Рис. 5. Микроструктура наружной поверхности трубы IV ступени пароперегревателя ($D \times S = 32,0 \times 4,5$ мм): а – разветвленные трещины; б – межзеренные разрушения с выкрашиванием отдельных зерен

Fig. 5. Microstructural analysis of the outer surface of the tube of IVth steam superheater stage ($D \times S = 32,0 \times 4,5$ mm): а – branched cracks; б – intergranular fracture with chipping of individual grains

также увеличения диаметра труб в месте разрыва. Это свидетельствует о том, что разрушение было бездеформационным, доминантным фактором разрушения явились внутрискрипционные процессы старения металла.

Во всех рассмотренных случаях разрушения выявлены с наружной стороны труб (рис. 5). При этом внутренняя поверхность труб оставалась чистой, без видимых дефектов. Разрушения представляют собой нераскрытые разветвленные трещины как в продольном, так и в поперечном направлениях с выкрашиванием металла по наружной поверхности (рис. 5, а). Обнаружено межзеренное коррозионное растрескивание металла на глубину до 3,3 мм, начинающееся с наружной поверхности и сопровождающееся выпадением целых зерен, что характерно для межкристаллитной коррозии (рис. 5, б).

Выводы. Показана возможность дифференцировать прочность зерен и прочность межзеренных границ и устанавливать поэтапность и направление процесса разрушения. Показано, что в процессе циклического деформирования свойства материала (зерен и межзеренных границ) изменяются в области деформаций между линией упрочнения и разупрочнения, характеризующей способность материала воспринимать повторные нагрузки без разрушения. Для идентификации состояния предразрушения приведен комплекс отличительных признаков и параметр исследуемого материала $P = (\sigma_1)_i / (\sigma_1)_{\max}$, ниже которого трещины в области деформаций между линией упрочнения и разупрочнения не активны.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Бугай Н.В., Березина Т.Г., Трунин И.И. Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 272 с.
- Достижения науки о коррозии и технологии защиты от нее. Коррозионное растрескивание металлов / Под ред. М. Фонтана, Р. Стейла; пер. с англ. под ред. В.С. Синявского. – М.: Металлургия, 1985. – 488 с.
- Makeev A.A., Lyubimova L.L., Zavorin A.S., Tashlykov A.A. Structural Instability in the Early Decomposition of Supersaturated Austenite Solid Solution // Steel in Translation. 2009. Vol. 39. No. 12. P. 1048 – 1055.
- Lyubimova L.L., Makeev A.A., Tashlykov A.A., Zavorin A.S., Fisenko R.N. Assessing the Life of Boiler on the Basis of Anomalous Thermal Deformation of Its Crustal Lattice // Steel in Translation. 2014. Vol. 44. No. 2. P. 117 – 122.
- Lyubimova L.L., Makeev A.A., Zavorin A.S., Tashlykov A.A., Artamontsev A.I., Lebedev B.V., Fisenko R.N. Consideration of Intrastuctural Stresses in the Processes Connected with the Effect of Structural Nonuniformity on Corrosion Damages Inflicted to Heatt Transfer Tubes // Thermal Engineering. 2014. Vol. 61. No. 8. P. 600 – 605.
- Паршин А.М. Сопротивляемость радиационному набуханию и охрупчиванию аустенитных хромоникелевых дисперсионно-твердеющих раствороупрочняемых сталей и сплавов с различным содержанием никеля. – В кн.: Сборник научных трудов. – Л.: изд. ЛПИ, 1984. С. 3 – 13.
- Вотинов С.Н., Кондратьев В.П., Речицкий В.Н. и др. Роль структурного фактора в радиационном упрочнении и охрупчивании хромоникелевой стали и никелевых сплавов // Физика и химия обработки материалов. 2002. № 1. С. 19 – 26.
- Асташов С.Е., Козманов Е.А., Огородов А.Н. и др. Основные результаты первичных послереакторных исследований ТВС реактора БН-600. – В кн.: Исследования конструкционных материалов элементов активной зоны быстрых натриевых реакторов: Сб. науч. тр. – Екатеринбург: УрО РАН, 1994. С. 48 – 84.
- Чуев В.В., Ланских В.Н., Огородов А.Н., Шейнкман А.Г. Работоспособность ТВС быстрых реакторов. – В кн.: Исследования конструкционных материалов элементов активной зоны быстрых натриевых реакторов: Сб. науч. тр. – Екатеринбург: УрО РАН, 1994. С. 85 – 140.
- Копельман Л.А. Сопротивляемость сварных узлов хрупкому разрушению. – Л.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
- Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.
- Wei Q., Jiao T., Ramesh K.T. Mechanical behavior and dynamic failure of high-strength ultrafine grained tungsten under uniaxial compression // Acta Mater. 2006. No. 54. P. 77 – 87.
- Вайнман А.Б., Школьников Б.Э., Смиян О.Д., Жабров А.В. Механизмы и причины «нетрадиционных» повреждений труб пароперегревателей котлов энергоблоков сверхкритического давления // Электрические станции. 2010. № 7. С. 15 – 32.
- Хапонен Н.А., Шевченко П.Н., Рассохин Г.И. Микроповрежденность как критерий оценки состояния металла и остаточного ресурса паропроводов ТЭС // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 5. С. 42 – 44.
- Friedel J., Gullity B.D., Crussard C. Study of the surface tension of a grain boundary in a metal as a function of the orientation of the two grains which the boundary separates // Acta Met. 1953. Vol. 1. P. 79 – 92.
- Иванова В.С. Разрушение металлов. Достижения отечественного металловедения. – М.: Металлургия, 1979. – 168 с.
- Регель В.Р., Слуцкер А.И., Тамашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
- Абдурашитов А.Ю., Георгиев М.Н., Межова Н.Я., Рейхарт В.А. К методике оценки остаточных напряжений в железнодорожных рельсах // Заводская лаборатория. 1991. № 4. С. 57, 58.
- Бархатин Б.К., Макаров В.В., Петров П.П. Распространение усталостной трещины в низкоуглеродистой мартенситной стали // Заводская лаборатория. 1991. № 3. С. 30 – 32.
- Любимова Л.Л., Makeev A.A., Zavorin A.S., Ташлыков А.А. Применение рентгенометрии в исследованиях структурной неоднородности труб поверхностей нагрева // Тяжелое машиностроение. 2014. № 7. С. 18 – 22.
- Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов. – М.: Альянс, 2014. – 624 с.

Поступила 3 марта 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 12, pp. 903–909.

ESTIMATION OF THE STRESS STATE AT ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION OF AUSTENITIC CHROMIUM-MANGANESE HEAT-RESISTANT STEEL

L.L. Lyubimova, A.A. Makeev, A.S. Zavorin, A.A. Tashlykov

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Abstract. The paper is devoted to the realization of the diagnostic of origin and development of the steel damage of energy equipment at micro- and submicrolevels. It requires taking into account special parameters,

reflecting individual properties of the material, as well as the introduction into the analysis of the processes, which one can observe in the elements of the equipment, and the parameters of substructure. Such parameters are the period of crystal lattice and inner structural states of the 1st and IInd kind. The authors also give the results of the essence of stress states at elastic plastic deformation of austenitic chromium-manganese steel. It has been shown that the processes of cyclic deformation are accompanied by the oscillation of inner states in the sphere of functioning states, limited by the curve of hardening-softening. The results have been analyzed from the point of view of the establishment of the characteristic features of preliminary fracture. The article gives the complex of distinguishing features and the material parameters, under which fractions in the area of deformation among the lines of hardening and softening are not active. The paper presents the results of metallographic research of the destroyed metal, matching with the conclusions of X-ray diagnostics.

Keywords: steel, period of crystal lattice, elastic plastic deformation, inner structural states of the 1st and IInd kind, relaxation, deformation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-903-909

REFERENCES

1. Bugai N.V., Berezina T.G., Trunin I.I. *Rabotosposobnost' i dolgovechnost' metalla energeticheskogo oborudovaniya* [Metal workability and durability of energy equipment]. Moscow: Energoatomizdat, 1994, 272 p. (In Russ.).
2. *Dostizheniya nauki o korrozii i tekhnologii zashchity ot nee. Korroziionnoe rastreskivanie metallov* [Achievements in science on corrosion and its protection. Metal stress corrosion cracking]. Fontan M., Staehle R. eds; translated from Eng. Moscow: Metallurgiya, 1985, 488 p. (In Russ.).
3. Makeev A.A., Lyubimova L.L., Zavorin A.S., Tashlykov A.A. Structural instability in the early decomposition of supersaturated austenite solid solution. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. 12, pp. 1048–1055.
4. Lyubimova L.L., Makeev A.A., Tashlykov A.A., Zavorin A.S., Fisenko R.N. Assessing the life of boiler on the basis of anomalous thermal deformation of its crystal lattice. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 2, pp. 117–122.
5. Lyubimova L.L., Makeev A.A., Zavorin A.S., Tashlykov A.A., Artamontsev A.I., Lebedev B.V., Fisenko R.N. Consideration of infrastructural stresses in the processes connected with the effect of structural nonuniformity on corrosion damages inflicted to heat transfer tubes. *Thermal Engineering*. 2014, vol. 61, no. 8, pp. 600–605.
6. Parshin A.M. Resistance to radiation swelling and embrittlement of austenite chromium-nickel dispersion-hardened solution-hardened steels and alloys with the different content of nickel. In: *Sbornik nauchnykh trudov* [Collected scientific papers]. Leningrad: LPI, 1984, pp. 3–13. (In Russ.).
7. Votinov S.N., Kondrat'ev V.P., Rechitskii V.N., Krasina T.A., The role of the structure in radiation strengthening and embrittlement of chromium-nickel steel and nickel alloys. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*. 2002, no. 1, pp. 19–26. (In Russ.).
8. Astashov S.E., Kozmanov E.A., Ogorodov A.N., Roslyakov B.F., Main results of primary post-irradiation researches of TVS reactor BH-600. In: *Issledovaniya konstruktsionnykh materialov elementov aktivnoi zony bystrykh natrievykh reaktorov: Sb. nauch. tr.* [Researches of structural materials of the active zone elements of the fast sodium reactors: Collected scientific papers]. Ekaterinburg: UrO RAN, 1994, pp. 48–84. (In Russ.).
9. Chuev V.V., Lanskikh V.N., Ogorodov A.N., Sheinkman A.G. Workability of TVS of fast reactors. In: *Issledovaniya konstruktsionnykh materialov elementov aktivnoi zony bystrykh natrievykh reaktorov: Sb. nauch. tr.* [Researches of structural materials of the active zone elements of fast sodium reactors: Collected scientific papers]. Ekaterinburg: UrO RAN, 1994, pp. 85–140. (In Russ.).
10. Kopel'man L.A. *Soprotivlyaemost' svarnykh uzlov khrupkomu razrusheniyu* [Resistance of welded nodes to the brittle fracture]. Leningrad: Mashinostroenie, 1978, 232 p. (In Russ.).
11. Rybin V.V. *Bol'shie plasticheskie deformatsii i razrushenie metallov* [High plastic deformations and metal destruction]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 224 p. (In Russ.).
12. Wei Q., Jiao T., Ramesh K.T. Mechanical behavior and dynamic failure of high-strength ultrafine grained tungsten under uniaxial compression. *Acta Mater.* 2006, no. 54, pp. 77–87.
13. Vainman A.B., Shkol'nikova B.E., Smiyan O.D., Zhabrov A.V. Mechanisms and reasons of “not-traditional” superheater pipe damages of lades of the supercritical pressure power units. *Elektricheskie stantsii*. 2010, no. 7, pp. 15–32. (In Russ.).
14. Khaponen N.A., Shevchenko P.N., Rassokhin G.I. Microdamage as the essence criteria of metal state and residual resource of TPP steamlines. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2004, no. 5, pp. 42–44. (In Russ.).
15. Friedel J., Gullity B.D., Crussard C. Study of the surface tension of a grain boundary in a metal as a function of the orientation of the two grains which the boundary separates. *Acta Met.*, 1953, vol. 1, pp. 79–92.
16. Ivanova V.S. *Razrushenie metallov. Dostizheniya otechestvennogo metallovedeniya* [Metal destruction. Achievements of physical metallurgy in Russia]. Moscow: Metallurgiya, 1979, 168 p. (In Russ.).
17. Regel' V.R., Slutsker A.I., Tamashevskii E.E. *Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel* [Kinetic nature of the strength of solids]. Moscow: Nauka, 1974, 560 p. (In Russ.).
18. Abdurashitov A.Yu., Georgiev M.N., Mezheva N.Ya., Reikhart V.A. On the methods of the essence of residual voltage in rails. *Zavodskaya laboratoriya*. 1991, no. 4, pp. 57–58. (In Russ.).
19. Barakhtin B.K., Makarov V.V., Petrov P.P. Distribution of a fatigue crack in low-carbon martensitic steel. *Zavodskaya laboratoriya*. 1991, no. 3, pp. 30–32. (In Russ.).
20. Lyubimova L.L., Makeev A.A., Zavorin A.S., Tashlykov A.A. Usage of roentgenometry in the research of structural heterogeneity of pipes of heating surfaces. *Tyazheloe mashinostroenie*. 2014, no. 7, pp. 18–22. (In Russ.).
21. Darkov A.V., Shpiro G.S. *Soprotivlenie materialov* [Material resistance]. Moscow: Al'yans, 2014, 624 p. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was financially supported by the Russian fund of fundamental researches “Fundamental basics of the engineering sciences”, project no. 15-08-99544a.

Information about the authors:

Lyubimova L.L., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Steam Generators Design and Units” (l11@tpu.ru)

Makeev A.A., Cand. Sci. (Eng.)

Zavorin A.S., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Steam Generators Design and Units” (zavorin@tpu.ru)

Tashlykov A.A., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Steam Generators Design and Units” (tashlykov@tpu.ru)

Received March 3, 2016

УДК 669.184.001.57

О НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ АЛГОРИТМАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ

Медведев А.В.¹, д.т.н., профессор кафедры «Системный анализ
и исследование операций» (saor_medvedev@sibsau.ru)

Корнет М.Е.¹, соискатель степени к.т.н. кафедры «Системный анализ
и исследование операций» (marya.kornet@gmail.com)

Чжан Е.А.², аспирант кафедры информационных систем (ekach@list.ru)

¹ Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнева
(660014, Россия, Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31)

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

Аннотация. Рассмотрена проблема предварительной обработки данных при идентификации многомерных дискретно-непрерывных процессов. Предложена методика генерации рабочей обучающей выборки из исходной, представленной данными нормальной эксплуатации исследуемого объекта. Используемая методика в какой-то степени напоминает бутстреп-процесс, который в данном случае базируется на исходной обучающей выборке, отражающей свойства идентифицируемого объекта. Методика позволяет автоматически решить проблему восстановления неизвестной стохастической зависимости на границе области определения соответствующих входных-выходных переменных объекта. Рассмотрена проблема идентификации кислородно-конвертерной плавки в конвертерном цехе № 2 ОАО «ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат» при недостатке текущей информации, наличии пропусков в выборке наблюдений. Предложена непараметрическая модель кислородно-конвертерной плавки. Модель базируется на новой рабочей выборке, которая содержит как измерения, так и сгенерированные данные по описанной методике. Использование рабочей выборки в качестве обучающей позволило повысить точность идентификации в два раза.

Ключевые слова: непараметрическая идентификация, априорная информация, дискретно-непрерывный процесс, безынерционный процесс, выборка наблюдений, анализ данных, кислородно-конвертерная плавка.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-910-915

При моделировании дискретно-непрерывных процессов в условиях неполной информации чаще всего используют идеи параметрической идентификации, то есть выбор структуры с точностью до вектора параметров [1, 2]. Следующий этап построения модели состоит в оценке этих параметров. В случае, если из-за недостатка априорных сведений о процессе нельзя выбрать модель с точностью до параметров, то естественно использовать методику непараметрической идентификации, которая относится к методам локальной аппроксимации функции по наблюдениям. В этом случае большую роль играет выборка наблюдений, которая, как правило, имеет сравнительно малые объемы, а также может содержать сгущения или пропуски, обусловленные характером протекания технологического процесса. Поэтому при непараметрическом моделировании возникает задача «ремонта» исходной выборки наблюдений и получения новой обучающей выборки, используемой в непараметрических моделях.

В настоящей работе показаны результаты восстановления непараметрических зависимостей на основе сгенерированных новых рабочих выборок, которые,

естественно, содержат в себе экспериментальные данные, но дополняются новыми в соответствии с предлагаемой методикой. Как показали результаты моделирования, точность восстановления соответствующих зависимостей возросла в два раза в отличие от зависимостей, построенных только при использовании данных нормальной эксплуатации. Последний факт обусловлен спецификой методов локальной аппроксимации.

Постановка задачи. Рассмотрим схему идентификации процесса кислородно-конвертерной плавки (рис. 1), где приняты следующие обозначения: (t) – непрерывное время; индекс t – дискретное время; x_t и u_t – измерения выходной переменной объекта $x(t)$ и управляющего воздействия $u(t)$; μ_t – измерения контролируемого возмущения $\mu(t)$; ω_t – измерения косвенных параметров; $\hat{x}_t$ – выход модели объекта; h_t^u , h_t^x , h_t^{ω} , h_t^{μ} – случайные помехи измерений, соответствующие переменным процесса; $\xi(t)$ – векторная случайная помеха; x_t^* – задающее воздействие.

Из практики известно, что основными управляющими воздействиями в процессе кислородно-конвер-

терной плавки являются расход кислорода на продувку, изменение высоты фурмы относительно зеркала ванны, количество присадок шлакообразующих и охлаждающих; контролируемые возмущения являются химический состав и температура чугуна; измеряемыми косвенными параметрами, которые играют роль дополнительной информации о течении процесса, являются температура и состав отходящих газов, температура охлаждающей фурмы воды и др.; выходные переменные: химический состав металла и шлака, температура металла перед выпуском [3].

Непосредственное измерение выходных переменных (параметров) кислородно-конвертерной плавки осуществляется обычно один – два раза за плавку. В рамках одного цикла, одной плавки, рассматриваемый процесс является дискретно-непрерывным, то есть по своей природе процесс является непрерывным, однако «входные-выходные» переменные процесса контролируются через дискретные моменты времени. Кислородно-конвертерной плавкой управляет машинист дистрибутора, который имеет в распоряжении результаты оценок переменных состояния, измерения косвенных параметров, характеризующих фактическое состояние процесса. Построение математической модели динамического поведения выходных величин плавки в виде формализованной структуры с точностью до параметров в такой ситуации затруднительно.

Учитывая многоканальность, многосвязность, дискретность контроля основных переменных процесса кислородно-конвертерной плавки и присутствие в управляющей системе оператора (в дальнейшем макрообъект), целесообразно построение адаптивных систем идентификации и управления. Располагая измерениями, можно повысить качество управления путем введения внешнего контура управления.

Рассмотрим идентификацию макрообъекта (показан на рис. 1 пунктирной линией). Представленная схема идентификации может быть использована для оценки основных параметров состояния в очередном цикле плавки. Входные переменные в таком случае представляются данными последних измерений, роль контролируемых внешних возмущений играют значения выходных параметров в предыдущем цикле плавки. Такой подход рассмотрен в работе [4].

Для исследования работоспособности предлагаемого алгоритма обработки исходных данных рассмотрим задачу идентификации каналов наблюдения вход – выход до начала плавки.

В этом случае можно выделить следующие управляемые входные переменные: u_1 – расход чугуна, т; u_2 – расход металлического лома, т; u_3 – расход извести, т; u_4 – расход электродного боя, т; u_5 – расход флюса ФОМИ, т; u_6 – расход агломерата офлюсованного, т; u_7 – расход угля (твердого топлива), т; u_8 – расход кислорода на продувку, м³; u_9 – расход кислорода на прогрев, м³; u_{10} – продолжительность продувки, мин.

Контролируемые внешние возмущения: μ_1 – содержание кремния, %; μ_2 – содержание марганца, %; μ_3 – содержание серы, %; μ_4 – содержание фосфора, %; μ_5 – температура чугуна, °С; μ_6 – масса металлозавалки, т.

Векторная выходная переменная x в целом характеризует параметры полученного металлического полупродукта: x_1 – температура металла, °С; x_2 – содержание углерода, %; x_3 – содержание марганца, %; x_4 – содержание серы, %; x_5 – содержание фосфора, %.

На процесс действуют разного рода случайные воздействия, такие как случайные помехи измерений, тепловое состояние футеровки агрегата и сталеразливочного ковша перед выпуском металла, угар легирующих элементов из вводимых феросплавов, усвоение присадок и т.д.

Процесс характеризуется входными переменными $u_1 - u_{10}$, $\mu_1 - \mu_6$ и выходными переменными $x_1 - x_5$. Измеряя значения входных и выходных переменных, имеем выборку наблюдений $\{(u_i, x_i), i = 1, s\}$. Таким образом, поставлена задача построения модели исследуемого технологического процесса по выборке наблюдений. Вследствие того, что нет конкретной априорной информации о виде зависимости, о ее структуре, можно использовать непараметрические методы решения задачи идентификации.

Непараметрическая идентификация. В качестве модели объекта (рис. 1) рассматривается непараметрическая оценка функции регрессии по наблюдениям Надарая-Ватсона [5].

Для объекта, имеющего m входных переменных и одну выходную переменную x , имеем выборку наблюдений $\{(u_i, x_i), i = 1, s\}$ случайных величин x, u , распределенных с неизвестными плотностями вероятности $p(x, u), p(u) > 0 \forall u \in \Omega(u)$. Для восстановления

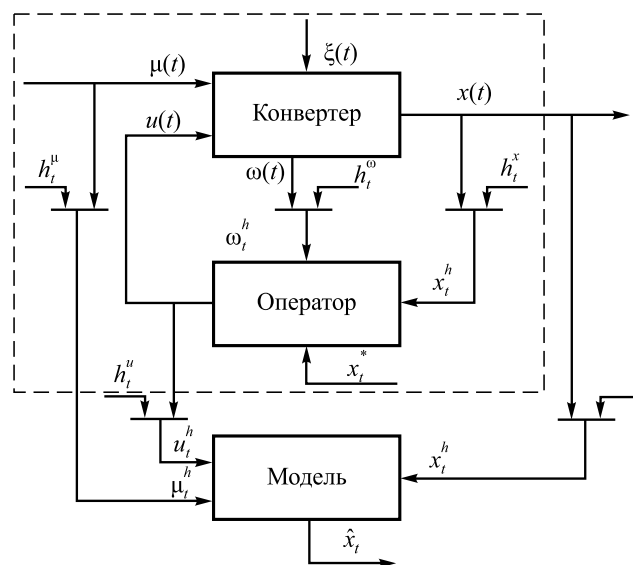


Рис. 1. Блок-схема идентификации кислородно-конвертерной плавки стали

Fig. 1. Block diagram of identification of BOF steel melting

$\hat{x} = M\{x|u\}$ можно использовать непараметрические оценки [6]:

$$x_s(u) = \frac{\sum_{i=1}^s x_i \prod_{j=1}^m \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j))}{\sum_{i=1}^s \prod_{j=1}^m \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j))}, \quad (1)$$

где $\Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j))$, $i = \overline{1, s}$, $j = \overline{1, m}$ – ядерная колоколообразная функция; c_s – коэффициент размытости ядра.

Значения $\Phi(\bullet)$ и c_s удовлетворяют следующим условиям [5]:

$$\begin{aligned} c_s > 0; \quad \lim_{s \rightarrow \infty} c_s &= 0; \\ \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)) \geq 0; \quad \int_{\Omega(u)} \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)) du^j &< \infty; \\ \lim_{s \rightarrow \infty} c_s^m &= \infty; \quad \lim_{s \rightarrow \infty} c_s^{-1} \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j)) = \delta(u^j - u_i^j). \end{aligned} \quad (2)$$

Настройка коэффициента размытости ядра осуществляется с помощью скользящего экзамена [7]. В качестве колоколообразной функции $\Phi(z)$, $z = c_s^{-1}(u^j - u_i^j)$ могут быть использованы различные функции (треугольное, прямоугольное, квадратическое ядро).

В настоящей работе было выбрано параболическое ядро (ядро Епанечникова [8]):

$$\Phi(z) = \begin{cases} 0,75(1-z)^2, & \text{если } |z| \leq 1; \\ 0, & \text{если } |z| > 1. \end{cases} \quad (3)$$

Для получения прогноза выхода объекта в точке $u^j = (u_1^j, u_2^j, \dots, u_m^j)$ необходимо по определенному правилу усреднить значения выхода для всех соседних точек выборки. Качество восстановления непараметрической оценки функции регрессии напрямую зависит от равномерности распределения точек в исходной выборке. Если же элементы выборки в пространстве входных и выходных переменных расположены неоднородно, то качество оценки будет низким.

Рассмотрим методику генерации рабочей выборки по исходным данным. При идентификации дискретно-непрерывных процессов недостатки в исходных данных заметно ухудшают качество моделирования, поэтому целесообразно проводить предварительный анализ исходных данных, направленный на улучшение их качества [9, 10]. Недостатки в выборке наблюдений при рассмотрении конвертерной плавки стали могут являться следствием причин технологического характера: различной дискретности контроля переменных, наличия дополнительных операций (например, додувок стали), сбоя датчиков контроля или следствием ошибки оператора. Под недостатками принято понимать пробелы в матрице наблюдений и выбросы, однако неоднородная плотность наблюдений в выборке также оказы-

вает негативное влияние на результат решения задачи идентификации [11].

Рассмотрим такие недостатки в выборке наблюдений, как «разреженность» и «пропуски» на примере объекта, имеющего две входные переменные u_1 , u_2 и одну выходную x . Поле корреляции представлено на рис. 2.

В областях разреженностей небольшое количество элементов, соответственно, при получении оценки (1) качество восстановления будет низким, так как малое количество точек попадет под колокол функции (3). Если же в областях отсутствуют наблюдения (пропуски), то прогноз получить не удастся. Предлагается сформировать новую обучающую выборку на основе исходной путем генерации дополнительных наблюдений в областях разреженностей и пропусков. Такой подход аналогичен методу бустрап в том, что на основе исходной выборки наблюдений будет получена новая [12, 13]. Такие выборки используются для оценивания параметров модели или законов распределения [14, 15]. Ключевое отличие предлагаемой методики состоит в генерации новых наблюдений, причем параметрическая структура процесса исследователю неизвестна.

В этом случае алгоритм генерации рабочей выборки будет последовательно состоять из следующих этапов:

- По исходной выборке $\{u_i, x_i, i = \overline{1, s}\}$ вычисляем с помощью скользящего экзамена величину параметра размытости ядра c_s .
- Для каждого элемента выборки находим число элементов ρ_{cp} , которое попадает под колокол с радиусом c_s .
- Из основной выборки $\{u_i, x_i, i = \overline{1, s}\}$ выбираем 30 % наблюдений $\{\tilde{u}_i, \tilde{x}_i, i = \overline{1, s'}\}$, $s' = 0,3s$, с наибольшим числом элементов под колоколом: $\rho_i(u', x') < \rho_{cp}(u', x')$.
- Для всей выборки $\{\tilde{u}_i, \tilde{x}_i, i = \overline{1, s'}\}$, $s' = 0,3s$ вычисляем ρ_{cp} .
- Для всех наблюдений выборки $\{u_i, x_i, i = \overline{1, s}\}$ проверяем условие $\rho_i < \rho_{cp}$. Если условие выполняется, то генерируем k наблюдений в c_s окрестности i -ого наблюдения, где $k = \rho_{cp} - \rho_i$.
- Для всех сгенерированных наблюдений вычисляем выход модели с помощью непараметрической оценки функции регрессии (1).

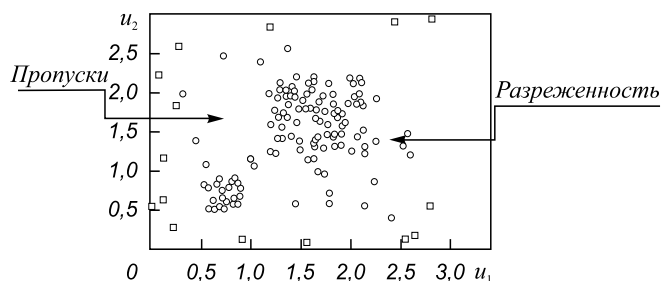


Рис. 2. Поле корреляции по входным переменным u_1 и u_2

Fig. 2. Correlation field for input variables u_1 and u_2

Таким образом, в областях разреженностей и пропусков будут сгенерированы новые наблюдения, плотность точек станет более однородной, под колокол функции (3) попадет большее количество точек, вследствие чего повысится качество идентификации. Сгенерированные элементы в совокупности с исходной выборкой будут составлять новую рабочую выборку, которую можно будет использовать в качестве обучающей при восстановлении оценки (1).

Многочисленные вычислительные эксперименты, проведенные с использованием средств статистического моделирования, подтвердили эффективность приведенной методики. Такие результаты, например, подробно описаны в работе [15].

Таким образом, можно сделать вывод, что генерация новой рабочей выборки из исходной, содержащей результаты натурных экспериментов, в несколько раз повышает точность восстановления стохастических зависимостей. Одновременно успешно может быть решена проблема восстановления зависимостей на границе области существования переменных.

Обработка экспериментальных данных. В настоящем исследовании обрабатывали данные паспортов плавок низкоуглеродистой стали. В исходную выборку ввели данные 176 плавок, выплавленных без нарушения технологической инструкции. При исследовании технологического процесса (рис. 1) были выделены 16 входных и 5 выходных переменных. Ключевыми переменными являются температура и химический состав стали на повалке: $x_1(u, \mu)$, $x_2(u, \mu)$, $x_3(u, \mu)$, $x_4(u, \mu)$, $x_5(u, \mu)$. Для перечисленных выходных переменных была построена непараметрическая оценка (1). Для оценки качества непараметрической модели вычислена квадратичная ошибка:

$$R = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s (x_{si} - x_i)^2;$$

здесь x_i – измеренное значение выходной переменной; x_{si} – полученная оценка.

Относительная ошибка прогнозирования вычисляется по формуле:

$$W = \sqrt{\frac{R}{D_s}},$$

где R – квадратичная ошибка; $D_s = \frac{1}{s-1} \sum_{i=1}^s (x_i - m_x)^2$ – несмещенная оценка дисперсии для выходной переменной объекта; m_x – оценка математического ожидания выхода объекта.

На первом этапе в качестве обучающей выборки использовали исходную выборку наблюдений, полученную при измерении входных и выходных переменных процесса. Число неопределенностей – количество элементов выборки, для которых не удалось получить

оценку (1). Неопределенность возникает, когда ни один элемент не попадает под колокол функции (3). По результатам моделирования видно (табл. 1), что ошибка прогнозирования W достаточно велика и почти равна единице для всех переменных, то есть $R \approx D_s$. Модель является грубой, показала неудовлетворительный результат. Кроме того, параметр c_s имеет достаточно большое значение, что негативно сказывается на качестве прогноза.

С помощью предложенной методики были сгенерированы новые наблюдения, которые в совокупности с исходной выборкой составили новую рабочую выборку. Теперь оценку (1) строили также для исходной выборки, но в качестве обучающей уже была использована новая рабочая выборка. Результаты моделирования представлены в табл. 2.

Использование новой рабочей выборки позволило повысить качество восстановления в среднем в два раза. Кроме того, количество элементов выборки, для которых не удалось получить оценку, значительно сократилось. Так, например, для переменной x_2 (содержание углерода) модель дает прогноз для всей выборки.

Выводы. Для решения задачи идентификации предложена методика получения рабочей выборки, дополняющей исходную. Применение этой методики позволяет наиболее полно использовать имеющиеся данные, учитывать их особенности и информацию, заключенную в них. Идентификация технологического процесса происходила в условиях малого количества априорной информации, когда структура объекта неизвестна. При обработке данных кислородно-конвертерной плавки генерация новой рабочей выборки позволила повысить

Т а б л и ц а 1

**Результаты моделирования
по исходной выборке наблюдений**

**Table 1. Simulation results for the original sample
of observations**

Переменная	R	D_s	W	Число неопределенностей	c_s
Температура металла (x_1)	24,250	24,290	0,99	19	1,43
Содержание углерода (x_2)	0,016	0,016	1,00	24	1,60
Содержание марганца (x_3)	0,026	0,027	0,95	18	1,50
Содержание серы (x_4)	0,004	0,005	0,85	15	1,60
Содержание фосфора (x_5)	0,005	0,005	1,00	18	1,50

Т а б л и ц а 2

**Результаты моделирования
по рабочей выборке наблюдений**

**Table 2. Simulation results for the working sample
of observations**

Переменная	R	D_s	W	Число неопре- делен- ностей	c_s
Температура ме- талла (x_1)	11,7500	24,290	0,48	5	1,27
Содержание угле- рода (x_2)	0,0090	0,016	0,59	0	1,30
Содержание мар- ганца (x_3)	0,0170	0,027	0,63	2	1,50
Содержание серы (x_4)	0,0018	0,005	0,35	1	1,60
Содержание фос- фора (x_5)	0,0029	0,005	0,57	1	1,50

качество идентификации в два раза и получить прогноз для всех элементов выборки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методы идентификации промышленных объектов в системах управления / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, А.С. Рыков и др. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2007. – 307 с.
2. Методы классической и современной теории автоматического управления. В 5 томах. Т. 2. Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления / Под ред.

- К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. Т. 2. – М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 640 с.
3. Медведев А.В. Основы теории адаптивных систем. – Красноярск: изд. СибГАУ, 2015. – 526 с.
4. Бойко В.И., Смоляк В.А. Автоматизированные системы управления технологическими процессами в черной металлургии: учебное пособие. – Днепропетровск: изд. ДГТУ, 1997. – 576 с.
5. Банникова А.В., Корнеева А.А., Корнет М.Е., Сергеева Н.А. О непараметрическом управлении стохастическим объектом с памятью // Вестник СибГАУ. 2014. Т. 55. № 3. С. 28 – 34.
6. Надарая Э.А. Непараметрическое оценивание плотности вероятностей и кривой регрессии. – Тбилиси: изд. Тбил. ун-та, 1983. – 194 с.
7. Лапко А.В., Ченцов С.В. Непараметрические системы обработки информации. – М.: Наука, 2000. – 350 с.
8. Епанечников В.А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности // Теория вероятностей и ее применения. 1969. Т. 14. № 1. С. 156 – 161.
9. Рубан А.И. Методы анализа данных: учебное пособие. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. – 319 с.
10. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. – Новосибирск: изд-во ИМ СО РАН, 1999. – 264 с.
11. Чжан Е.А. К проблеме генерации выборки при идентификации безынерционных процессов // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16. № 2. С. 368 – 375.
12. Орлов А.И. Компьютерно-статистические методы: состояние и перспективы // Научный журнал КубГАУ. 2014. № 103 (09). С. 1 – 33.
13. Pilar García Soidán, Raquel Menezes, Óscar Rubiños. Bootstrap approaches for spatial data // Stoch Environ Res Risk Assess. 2014. No 28. P. 1207 – 1219.
14. Ji Meng Loh, Michael L. Stein. Spatial bootstrap with increasing observations in a fixed domain // Statistica Sinica. 2008. No. 18. P. 667 – 688.
15. Kunsch H.R. The jackknife and the bootstrap for general stationary observations // Ann. Statist. 2008. No 17. P. 1217 – 241.

Поступила 20 мая 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 12, pp. 910–915.

ON NONPARAMETRIC MODELING ALGORITHMS OF BOF PROCESS

A.V. Medvedev¹, M.E. Kornet¹, E.A. Chzhan²

¹Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev, Krasnoyarsk, Russia

²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. The problem of data pre-processing in the identification of multi-dimensional discrete-continuous processes is considered. The main content of the paper is devoted to the method of generating working training sample from the initial one, represented by the data of the object normal operation. This step is very important in the non-parametric identification of discrete-continuous processes. Non-parametric identification algorithms belong to the class of local approximations of unknown stochastic dependencies. In nonparametric identification the step of selecting an object model to the accuracy up to the parameter vector is absent. This approach takes place in the variety of real problems, because the priori existing information is not enough to determine the reasonable parametric model structure. The procedure presented below is similar to bootstrap based on the initial training sample, which reflects the characteristics of the identified object. Numerous computational experiments carried out by statistical modeling have showed high efficiency of generation techniques discussed below which is laid into the foundation of the adaptive system mode-

ling. In addition, it can automatically solve the problem of restoration an unknown stochastic dependence on the definition boundary of the relevant input-output object variables. The following technics and algorithms of nonparametric recovery stochastic dependencies were used to study the oxygen-converter process. A sample of observations made from passports of 176 low carbon oxygen steel melted by the contract at JSC “EVRAZ ZSMK” oxygen-converter workshop No. 2. New working sample which contains both the measurements and the generated data was formed according to the proposed methodology. Using the working sample makes it possible to increase the accuracy of the training simulation in 2–3 times.

Keywords: non-parametric modeling, priori information, discrete-continuous process, instantaneous process, sample of observations, data analysis, BOF process.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-12-910-915

REFERENCES

1. Emel'yanov S.V., Korovin S.K., Rykov A.S. etc. *Metody identifikatsii promyshlennykh ob"ektov v sistemakh upravleniya* [Methods of identification of industrial objects in the control systems]. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2007, 307 p. (In Russ.).

2. *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya. V 5 tomakh. T. 2. Statisticheskaya dinamika i identifikatsiya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classical and modern control theory. In 5 vols. Vol. 2. Statistical dynamics and identification of automatic control systems]. Pupkov K.A., Egupov N.D. eds. Moscow: izd. MGTU im. N.E. Bauman, 2004, 640 p. (In Russ.).
3. Medvedev A.V. *Osnovy teorii adaptivnykh sistem* [Basic theory of adaptive systems]. Krasnoyarsk: izd. SibGAU, 2015, 526 p. (In Russ.).
4. Boiko V.I., Smolyak V.A. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami v chernoi metallurgii: uchebnoe posobie* [Automated control systems of processes in the steel industry: Tutorial]. Dneprodzerzhinsk: izd. DGTU, 1997, 576 p. (In Russ.).
5. Bannikova A.V., Korneeva A.A., Kornet M.E., Sergeeva N.A. Non-parametric stochastic object control with memory. *Vestnik SibGAU*. 2014, vol. 55, no. 3, pp. 28–34. (In Russ.).
6. Nadaraya E.A. *Neparametricheskoe otsenivanie plotnosti veroyanos-tei i krivoi regressii* [Non-parametric estimation of probability density and regression curve]. Tbilisi: izd. Tbil. un-ta, 1983, 194 p. (In Russ.).
7. Lapko A.V., Chentsov S.V. *Neparametricheskie sistemy obrabotki informatsii* [Nonparametric data processing systems]. Moscow: Nauka, 2000, 350 p. (In Russ.).
8. Epanechnikov V.A. Non-parametric estimation of a multidimensional density of probability. *Teoriya veroyatnostei i ee primeneniya*. 1969, vol. 14, no. 1, pp. 156–161. (In Russ.).
9. Ruban A.I. *Metody analiza dannykh: uchebnoe posobie* [Methods of data analysis: Tutorial]. Krasnoyarsk: IPTs KGTU, 2004, 319 p. (In Russ.).
10. Zagoruiko N.G. *Prikladnye metody analiza dannykh i znanii* [Applied methods of data analysis and knowledge]. Novosibirsk: izd-vo IM SO RAN, 1999, 264 p. (In Russ.).
11. Chzhan E.A. On the problem of generation of the sample in the identification of non-inertia processes. *Vestnik SibGAU*. 2015, vol. 16, no. 2, pp. 368–375. (In Russ.).
12. Orlov A.I. Computer statistical methods: state and prospects. *Nauchnyi zhurnal KubGAU*. 2014, no. 103(09), pp. 1–33. (In Russ.).
13. Pilar Garcia Soidán, Raquel Menezes, Óscar Rubiños. Bootstrap approaches for spatial data. *Stoch Environ Res Risk Assess*. 2014, no. 28, pp. 1207–1219.
14. Ji Meng Loh, Michael L. Stein. Spatial bootstrap with increasing observations in a fixed domain. *Statistica Sinica*. 2008, no. 18, pp. 667–688.
15. Kunsch H.R. The jackknife and the bootstrap for general stationary observations. *Ann. Statist.* 2008, no. 17, pp. 1217–241.

Information about the authors:

A.V. Medvedev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “System Analysis and Operations Research” (saor_medvedev@sibsau.ru)

M.E. Kornet, Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair “System Analysis and Operations Research” (marya.kornet@gmail.com)

E.A. Chzhan, Postgraduate of the Chair of Information Systems (ekach@list.ru)

Received May 20, 2016

К 85-ЛЕТИЮ ВЛАДИМИРА НИКОЛАЕВИЧА ПЕРЕТЯТЬКО



7 ноября 2016 г. исполнилось 85 лет профессору кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК», заслуженному деятелю науки и техники РФ Владимиру Николаевичу Перетятко.

После окончания Сибирского металлургического института в 1954 году, получив специальность инженера по обработке металлов давлением, В.Н. Перетятко активно включился в научную и педагогическую деятельность, пройдя путь от старшего лаборанта до профессора.

В.Н. Перетятко – известный в нашей стране и за рубежом специалист в области обработки металлов давлением. Под его руководством и при непосредственном участии выполняются гранты Министерства образования РФ по фундаментальным исследованиям в области технических наук раздела «Металлургия», подраздела «Прокатное производство», в рамках которых проведен ряд фундаментальных исследований по формоизменению металла при прокатке железнодорожных рельсов. По программе Министерства образования РФ «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» им выполнен ряд работ по разделам «Ресурсосберегающие технологии в металлургическом производстве» и «Технологии и технологические совмещенные модули для металлургического производства».

Теоретические положения, разработанные Владимиром Николаевичем, позволили решить широкий круг задач, направленных на улучшение качества металлопродукции на ведущих металлургических предприятиях страны, легли в основу разработки технологий нагрева и деформирования металла, что позволило решить проблемы прокатки высоколегированных и двухслойных марок стали.

В.Н. Перетятко автор более 500 научных и учебно-методических работ, в том числе 30 изданы за рубежом, семи монографий, 17 авторских свидетельств и патентов. Им подготовлено и издано пять лекционных курсов на английском языке в Египте, два лекционных курса в Мексике и три лекционных курса на немецком языке в Германии. Владимир Николаевич является членом-корреспондентом Российской инженерной академии. За 53 года научно-педагогической деятельности им подготовлено более 2500 инженеров, 33 кандидата наук и 7 докторов наук, почти 30 лет он был членом редакционной коллегии журнала «Известия вузов. Черная металлургия».

В.Н. Перетятко обладает большим опытом педагогической деятельности, которую он начал в 1955 году, обогащая и совершенствуя ее в зарубежных учебных заведениях Германии, Египта, Мексики, где он проявил себя как талантливый педагог и организатор. Владимир Николаевич неоднократно принимал приглашения по чтению лекций в Чехословакии, Германии, Индии, Ираке.

За высокие достижения в научно-педагогической деятельности В.Н. Перетятко награжден медалью «Ветеран труда», знаком «За отличные успехи в работе», знаком «Почетный работник высшего профессионального образования», «Заслуженный деятель науки и техники РСФСР», медалью Кемеровской области «70 лет Кемеровской области». В 2010 году Владимир Николаевич удостоен звания «Почетный гражданин Кемеровской области», в 2013 году – «Почетный профессор Кузбасса», а в 2016 году – «Герой Кузбасса».

Профессионал высокого уровня, доброжелательный, подтянутый и собранный В.Н. Перетятко пользуется заслуженным уважением и авторитетом у коллег и студентов.

Коллектив университета и редакция журнала сердечно поздравляют Владимира Николаевича с юбилеем, желают ему творческих успехов, энергии и здоровья.

Указатель статей, помещенных в журнале «Известия высших учебных заведений. Черная металлургия» за 2016 год

РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Алпатова А.А., Симонян Л.М., Исакова Н.Ш. Изучение процесса пылеобразования при дуговом нагреве оцинкованной стали	5
Базегский А.Е., Школлер М.Б. Исследование процесса термического растворения угля с целью получения связующего для огнеупорных масс. Сообщение 1. Получение связующего	8
Дмитриенко В.И. Особенности применения природных и техногенных материалов для микролегирования и модифицирования стали	6
Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Рыбенко И.А., Ходосов И.Е. Разработка основ энергоэффективных процессов металлизации с использованием термодинамического моделирования	4
Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Ходосов И.Е. Получение металлизированных продуктов с использованием углей Кузбасса	10
Орелкина Д.И., Петелин А.Л., Подулях Л.А., Подгородецкий Г.С. Модель расчета концентрации вторичных металлургических выбросов в атмосфере	5
Павлов А.В., Римошевский В.С. Способы утилизации отработанных молибденсодержащих катализаторов нефтехимического синтеза	1
Тимофеева А.С., Никитченко Т.В., Федина В.В., Елисеєва К.А. Влияние ударных нагрузок на прочность железорудных окатышей	12
Якубайлик Э.К., Ганженко И.М., Бутов П.Ю. Удельная магнитная восприимчивость железных руд сибирских месторождений	12

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Абдыкирова Г.Ж., Танекеева М.Ш., Сыдыков А.Е., Дюсенова С.Б. Оценка возможности получения электролитического диоксида марганца из очищенных растворов после выщелачивания марганцесодержащего шлама	5
Богатов Н.А., Богатов А.А., Салихьянов Д.Р. Исследование совместной деформации труб из разнородных металлов при изготовлении слоистой композиционной трубы	7
Бородин А.А., Кабулова Е.Г., Положенцев К.А. Анализ получаемого видеоизображения для определения отклонений технологического процесса при переплаве расходоуемых электродов в вакуумной дуговой печи	5
Василев Я.Д. Математические модели предела текучести углеродистых и легированных сталей в диапазоне дорекристаллизационных температур деформации	6
Вдовин К.Н., Горленко Д.А., Феоктистов Н.А. Влияние энергии дефекта упаковки на абразивную износостойкость отливок из стали Fe – 12Mn – 1,2C, охлажденных с различными скоростями	9
Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Синицкий Е.В., Горленко Д.А., Дуров Н.А. Выплавка высокомарганцевистой стали в дуговой сталеплавильной печи. Внепечная обработка. Сообщение 2	1
Герасимова А.А., Радюк А.Г., Титлянов А.Е. Создание износостойкого слоя на узких стенках кристаллизаторов МНЛЗ с использованием алюминиевого и хромоникелевого газотермических покрытий	7
Гнигитев П.А., Бирюков А.Б. Исследование влияния типа футеровки на продолжительность воздушного охлаждения металла в камерных печах	11
Горбатюк С.М., Шаповал А.А., Мосьян Д.В., Драгобецкий В.В. Физические основы технологии производства заготовок перидического профиля вибрационным волочением	7
Даненко В.Ф., Гуревич Л.М., Кушкина Е.Ю., Гладских Э.Б. О расширении области применения пластически обжатых стальных прядей и изготовленных из них канатов	11
Дубинин А.М., Маврин С.П. Оптимальные параметры паровой газификации углей в газогенераторе с заторможенным циркуляционным псевдоожиженным слоем	11

Загайнов С.А., Филатов С.В., Гилева Л.Ю., Лозович А.В., Джи-мо С.О. Оценка возможности управления тепловым состоянием верха доменной печи в периферийной области	6
Иванова В.А., Вдовин К.Н. Метод испытания для определения истираемости и абразивной способности литейного кокса	3
Кабаков З.К., Сенатова И.А., Габелая Д.И. Математическое моделирование формирования зазора между заготовкой и кристаллизатором при непрерывной разливке стали	10
Коликов А.П., Звонарев Д.Ю., Таупек И.М., Кадыльников С.В., Галимов М.Р. Математическая модель пластического формоизменения листовой заготовки для изготовления сварных труб большого диаметра. Сообщение 1	7
Коликов А.П., Звонарев Д.Ю., Таупек И.М., Кадыльников С.В., Галимов М.Р. Математическая модель пластического формоизменения листовой заготовки для изготовления сварных труб большого диаметра. Сообщение 2	9
Крюков Р.Е., Бендре Ю.В., Галевский Г.В., Козырев Н.А., Горюшкин В.Ф. Термодинамические аспекты удаления водорода при сварке под фторсодержащими флюсами	2
Лабер К.Б., Дья Х.С., Кавалек А.М., Богатов А.А., Нухов Д.Ш. Влияние температурно-скоростных условий на сопротивление деформации углеродистой низколегированной стали	9
Леонтьев Л.И., Алымов М.И. Фундаментальные исследования как основа создания новых материалов и технологий в области металлургии. Часть 2. Порошковые наноматериалы	5
Леонтьев Л.И., Григорович К.В., Костина В.М. Фундаментальные исследования как основа создания новых материалов и технологий в области металлургии. Часть 1	1
Лехов О.С., Раскатов Е.Ю. Динамика захвата двутавровой заготовки валками обжимной клетки 1300 универсально-балочного стана	4
Ливаткин П.А., Положенцев К.А. Управление с помощью программного шага для вакуумной дуговой печи	1
Лоза А.В., Чигарев В.В., Рассохин Д.А., Шишкин В.В. Исследование напряженного состояния литого металла при циклическом нагреве	11
Лопатенко А.Д., Орехов Д.М., Семин А.Е. Анализ технологической схемы производства трубной стали с целью разработки предложений для повышения качества готовой продукции	11
Максимов А.Б., Гуляев М.В., Ерохина И.С. Исследование повреждаемости толстолистовой стали при циклическом пластическом изгибе	3
Меламуд С.Г., Юрьев Б.П. Исследование процесса окисления в железорудных материалах при умеренных и высоких температурах	6
Михайлов А.М., Зубарев К.А., Котельников Г.И., Семин А.Е., Григорович К.В. Модель испарения компонентов никелевых сплавов при плавке в вакуумной индукционной печи	1
Муляков В.И., Олейник Т.А., Ляшенко В.И., Кириченко А.М., Олейник М.О. Повышение эффективности работы осадительных камер для утилизации пыли металлургического производства	7
Павловец В.М. Формирование структуры железорудных окатышей, полученных с использованием теплосилового напыления влажной шихты	12
Павловец В.М., Герасимук А.В. Сравнительная оценка термических напряжений в объеме железорудных окатышей с дифференцированной пористостью	8
Панов А.Г., Цепелев В.С., Конашков В.В. Исследование возможности повышения качества центробежнолитых чугуновых заготовок обработкой расплавов карбонатами ШЗМ	1
Петрышев А.Ю., Берсенов И.С., Боковиков Б.А., Ярошенко Ю.Г. Исследование особенностей формирования оксидов азота при агломерации железных руд	4
Пилипенко С.С., Байгузин М.Р., Потаненков А.П. Удельная работа сил резания проката ножницами	8
Полевой Е.В., Темлянец М.В., Сюсюкин А.Ю. Определение скорости охлаждения по сечению головки железнодорожных рельсов при термической обработке воздухом	8

Постольник Ю.С., Тимошпольский В.И., Трусова И.А. Аналитические расчеты режимов затвердевания и охлаждения крупнотоннажных промышленных слитков. Сообщение 2. Тепловой режим слитков в теплотехнологической цепи от разливки до выдачи в прокатный стан	2
Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Сидорова Т.Ю. Моделирование теплового состояния воздушных фурм доменных печей	9
Рябчиков М.Ю., Гребенникова В.В., Рябчикова Е.С., Богданов Н.В. Модель разрушения металлургического агломерата	3
Савинов А.С. Расчет на прочность отливки при формировании ее полости цилиндрическим стержнем	1
Самусев С.В., Жигулев Г.П., Фадеев В.А., Манахов К.С. Моделирование процесса формоизменения трубной заготовки на специализированной профилировочной установке	3
Смирнов А.Н., Куберский С.В., Головчанский А.В., Максеев Е.Н., Ухин В.Е. Исследование особенностей формирования следов качания на поверхности непрерывнолитой заготовки	4
Смирнов Е.Н., Скляр В.А., Белевитин В.А., Шмыгля Р.А., Смирнов О.Е. Развитие подходов к исследованию на физических моделях механизмов «залечивания» дефектов сплошности осевой зоны непрерывнолитой заготовки	5
Степанов М.С., Домбровский Ю.М. Термодинамический анализ реакций формирования карбидного слоя в стали при микродуговом насыщении молибденом	2
Телин Н.В., Синицын Н.Н. Оценка температурных условий службы роликов металлургических машин в условиях наклепобразования	7
Титова К.О., Котельников Г.И., Зубарев К.А., Григорович К.В. Анализ процесса восстановления железа из футеровки при выплавке никель-медных сплавов в вакуумных индукционных печах	12
Федосов А.В. Применение неравномерных расчетных сеток для математического моделирования процессов формирования непрерывнолитой заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ	2
Харитонов Е.А., Будников А.С., Романенко В.П. Распределения удельной силы металла на валок в процессе раскатки труб на трехвалковом стане винтовой прокатки	9
Харитонов Е.А., Романенко В.П., Будников А.С. Разработка методики расчета деформационных параметров при раскатке гильз в трехвалковом стане винтовой прокатки	3
Чернышов Е.А., Евлампиев А.А., Королев А.В., Иванова Л.А., Моисеева О.В. Термомеханические свойства форм на различных связующих и условия формирования качественных отливок	8
Чуккин М.В., Полякова М.А., Гулин А.Е. Особенности влияния комбинирования различных видов пластической деформации на измельчение микроструктуры и механические свойства углеродистой проволоки	8
Швыдкий В.С., Фатхутдинов А.Р., Девятых Е.А., Девятых Т.О., Спирин Н.А. К математическому моделированию слоевых металлургических печей и агрегатов. Сообщение 1	9
Шинкин В.Н. Методика расчета геометрии стального листа при предварительной правке на семирوليковой правильной машине	11
Шинкин В.Н. Расчет сил и моментов семирوليковой правильной машины при предварительной правке стального листа	12
Шульц Л.А. О проблемах контроля и снижения высокотемпературного угара стали в нагревательных печах	7
Юрьев Б.П., Гольцев В.А. Изучение теплофизических свойств титаномагнетитовых качканарских окатышей	5
Ярошенко Ю.Г., Спирин Н.А., Швыдкий В.С., Гордон Я.М., Лавров В.В. Эволюция схем теплообмена в доменной печи	8
Ярошенко Ю.Г., Швыдкий В.С., Спирин Н.А., Лавров В.В. Стационарный теплообмен в орошаемой расплавом зоне доменной печи	2

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Александров А.А., Дашевский В.Я., Леонтьев Л.И. Термодинамика растворов кислорода в расплавах никеля, содержащих алюминий и титан	7
---	---

Вдовин К.Н., Горленко Д.А., Феоктистов Н.А. Исследование закономерностей формирования, морфологии и химического состава избыточной фазы в литой высокомарганцевистой стали ...	7
Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Ченцов В.П., Кудinov Д.З., Селиванов Е.Н. Формирование металлической фазы при барботаже газом-восстановителем многокомпонентного оксидного расплава. Сообщение 1. Теоретические основы процесса	9
Зубарев К.А., Котельников Г.И., Титова К.О., Семин А.Е., Михайлов М.А. Прогнозирование температуры ликвидус сложнотелегированных сплавов на основе никеля	9
Краюшкин Н.А., Кузнецова Н.П., Прибытков И.А., Шатохин К.С. Исследование влияния неоднородности граничных условий на интенсивность охлаждения цилиндрических заготовок в МНЛЗ	9
Овчинникова Е.В., Горбунов В.Б., Шаповалов А.Н., Писарев С.А., Дуров Н.М. Сравнительный анализ поведения магнийсодержащих материалов Южного Урала при температурах агломерационного процесса	11
Руденко А.Л. Кинетика межфазного перехода серы в процессе ковшевого рафинирования чугуна магнием	12
Румянцев Б.А., Комолова О.А., Григорович К.В., Гарбер А.К., Табаков Я.И. Изучение кинетики окисления углерода в хромсодержащих расплавах аргоно-кислородной плазмой	9
Румянцев Б.А., Комолова О.А., Григорович К.В., Гарбер А.К. Исследование процессов испарения компонентов реакционной зоны при обработке хромсодержащих расплавов низкотемпературной плазмой	11
Юрьев Б.П., Гольцев В.А. Исследование процесса окисления магнетита	10

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Лыкасов А.А., Рысс Г.М., Шарафутдинов Д.Г., Погодин А.Ю. Извлечение железа из отвального шлака медеплавильного производства	9
---	---

РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В. Карбидизация технологического микрокремнезема буроугольным полукоксом	2
---	---

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

Богатов А.А., Павлов Д.А., Павлова Е.А. МКЭ – моделирование нового способа прокатки труб на короткой оправке с натяжением	1
Ерошенко С.П., Ошовская Е.В., Ткачев М.Ю. Исследование и совершенствование системы быстрой смены погружных стаканов промежуточного ковша слябовой МНЛЗ	1
Козырев Н.А., Кибко Н.В., Уманский А.А., Титов Д.А., Никитин А.Г. Исследование и разработка новых составов порошковой проволоки системы С – Si – Mn – Cr – V – Mo для наплавки прокатных валков	10
Кривенко С.В. Исследования зональной структуры агломерируемого слоя	8
Никитин А.Г., Абрамов А.В., Гредина А.А., Гаряшин В.В. Анализ работы шарнира кривошип – коренная опора кривошипно-коромыслового механизма щековой дробилки	12
Огарков Н.Н., Звягина Е.Ю., Залетов Ю.Д., Хоменко Н.Н., Керимова Л.Ф. Повышение плотности пиков микрогеометрии автомобильного листа за счет совершенствования контрукции дробельной установки	12
Пилипенко С.С., Багузин М.Р., Потепенков А.П. Разработка и исследование гидравлического редукторно-мультипликаторного привода с блочными дозаторами	10
Подгороденский Г.С., Третьяк А.А., Горбунов В.Б., Полулях Л.А. Перспективы использования политопливного газогенератора в практике работы доменных цехов	12

Полевой Е.В., Юнин Г.Н., Темлянец М.В. Разработка и промышленное освоение технологии дифференцированной термической обработки железнодорожных рельсов с использованием тепла прокатного нагрева	10
Рахманов С.Р., Ольшанский В.П. Особенности функционирования стержневой системы механизма удержания оправки автоматического стана с учетом переменности массы системы	2
Рубин Г.Ш., Чукин М.В., Гун Г.С., Полякова М.А. Функционально-целевой анализ как метод структурирования свойств и функций металлоизделий	10
Сотников А.Л. Диагностирование электромеханического привода механизма качания кристаллизатора МНЛЗ	5
Якубайлик Э.К., Ганженко И.М., Бутов П.Ю., Килин В.И. Уровень потерь магнетитового железа при мокрой сепарации	6

СТАЛИ ОСОБОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Авдеев А.М., Моляров В.Г., Калашникова А.В., Бочаров А.Н., Моляров А.В. Высокотехнологичный биметаллический конструкционный материал повышенной прочности, легированный азотом	11
Капуткина Л.М., Свяжин А.Г., Смарикина И.В., Бобков Т.В. Коррозионная стойкость в разных средах высокопрочной аустенитной азотистой хромоникельмарганцевой стали	9
Любимова Л.Л., Макеев А.А., Загорин А.С., Ташлыков А.А. Оценка напряженного состояния при упруго-пластических деформациях аустенитной хромомарганцевой жаропрочной стали	12
Смирнов А.Н., Козлов Э.В., Радченко М.В., Князьков К.В., Князьков В.Л. Структурно-фазовое состояние покрытий системы Ni – Cr – B – Si – Fe/WC после плазменно-порошковой наплавки с применением нанопорошков	4
Целев В.С., Поводатор А.М., Гроховский В.И., Вьюхин В.В., Коначков В.В. Исследование физических свойств расплавов «железных» метеоритов	6

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Акимов В.В., Мишуров А.Ф., Акимова Е.В. Жаростойкость безвольфрамовых твердых сплавов TiC – TiN в зависимости от объемного состава композиции при нагреве до высоких температур	10
Бараникова С.А., Бочарева А.В., Лунев А.Г., Шляхова Г.В., Зуев Л.Б. Изменение скорости ультразвука при пластической деформации высокохромистой стали	8
Бараникова С.А., Иванов Ю.Ф., Косинов Д.А., Коновалов С.В., Громов В.Е. Влияние водорода на локализацию пластической деформации и структуру в низкоуглеродистой стали при электролитическом насыщении	2
Бараникова С.А., Косинов Д.А., Зуев Л.Б., Громов В.Е., Коновалов С.В. Влияние водорода на макролокализацию пластической деформации низкоуглеродистой стали	12
Воробьев С.В. Увеличение усталостной долговечности сталей различных структурных классов электронно-пучковой обработкой	4
Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Морозов К.В., Перегудов О.А., Юрьев А.Б. Физическая природа упрочнения рельсов в процессе длительной эксплуатации	6
Дементьев В.П., Фейлер С.В., Бойков Д.В., Козырев Н.А., Полевой Е.В. Результаты эксплуатации рельсов импортного производства на восточно-сибирской железной дороге	6
Иванов Д.И., Кожухов А.А., Уразова Л.Ф. Механизм высокотемпературной коррозии жаростойкой хромоникелевой стали	3
Иванов Ю.Ф., Морозов К.В., Перегудов О.А., Громов В.Е. Эксплуатация рельсовой стали: деградация структуры и свойств поверхностного слоя	8
Козырев Н.А., Кибко Н.В., Уманский А.А., Титов Д.А., Башенко Л.П. Совершенствование состава порошковых проволок системы C – Si – Mn – Cr – W – V с целью повышения качества и эксплуатационных характеристик наплавленного слоя	11
Копцева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Никитенко О.А., Барышников М.П., Жеребцов М.С. Формирование ультрамелкозернистой структуры углеродистой стали при высокоскоростной деформации сжатием при повышенных температурах	2
Кузовов С.С., Макаренко К.В., Жижкина Н.А. Методика исследования дефектов типа «горячая трещина»	11
Лобанов М.Л., Русаков Г.М., Редикульцев А.А., Карабанов М.С., Лобанова Л.В. Специальные границы в процессе вторичной рекристаллизации в сплаве Fe – 3 % Si	6
Муравьев В.И., Бахматов П.В., Плетнев Н.О., Дебеляк А.А. Влияние напряженного состояния на структуру и свойства при сварке конструкций из сталей и сплавов	4
Муравьев В.В., Ленков С.В., Дедов А.И., Байтерьяков А.В., Котоломов А.Ю. Влияние одноосного растяжения образцов стали 09Г2С после различной термической обработки на акустические структурные шумы	2
Носкова Н.И., Чурбаев Р.В., Филиппов Ю.И. Нанокристаллические тонкослоистые композиционные покрытия. Получение, структура и свойства	4
Перегудов О.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Морозов К.В., Коновалов С.В. Формирование структурно-фазовых состояний в рельсах высшей категории качества	4
Сарычев В.Д., Громов В.Е., Невский С.А., Низовский А.И., Коновалов С.В. Формирование нанослоев за счет развития гидродинамических неустойчивостей при внешних энергетических воздействиях	10
Сарычев В.Д., Хаимзон Б.Б., Невский С.А. Моделирование процесса растворения ниобия в железе при электродуговой наплавке	8
Симачев А.С., Осколкова Т.Н., Темлянец М.В. Влияние неметаллических включений рельсовой стали на высокотемпературную пластичность	2
Столяров В.В. Роль химического и фазового составов в проявлении электропластического эффекта	6
Тягунов А.Г., Вьюхин В.В., Тягунов Г.В., Барышев Е.Е., Аксентьев Ю.Н. Влияние концентрации хрома на процесс структурообразования жидких хромоникелевых сплавов	8
Хлыбов А.А., Углов А.Л. Исследование накопления усталостных повреждений в образцах из стали 08Х18Н10Т при малоцикловой усталости	3

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И АВТОМАТИЗАЦИЯ
В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Еремин А.В., Стефанюк Е.В., Абишева Л.С. Идентификация источника теплоты на основе аналитического решения задачи теплопроводности	5
Ивашко А.Г., Цыганова М.С., Набатов Р.И. Исследование кинетики распада переохлажденного аустенита порошковых сталей различной пористости методом имитационного моделирования	3
Кирикова О.В., Лапина Л.А., Капустина С.В. О подходе к разработке информационной системы управления технологическим объектом металлургии	4
Медведев А.К., Корнет М.Е., Чжан Е.А. О непараметрических алгоритмах моделирования кислородно-конверторной плавки ..	12
Мышляев Л.П., Агеев Д.А., Чернявский С.В. Управление заключительным периодом продувки кислородно-конвертерной плавки стали с идентификацией модели	2
Сеченов П.А., Цымбал В.П. Имитационное моделирование гравитационного сепаратора в колонном струйно-эмульсионном реакторе	4
Сошкин С.В., Рутковский А.Л., Сошкин Г.С., Мешков Е.И., Ковалева М.А. Разработка и сопоставительный анализ математических моделей формирования качества электродной продукции при обжиге	3
Постольник Ю.С., Тимошпольский В.И., Трусова И.А. Нагрев тел в металлургических печах на основе модели теоретического противотока	10
Тимошпольский В.И. К теории нагрева в противотоке термомассивных тел излучением и конвекцией одновременно	7
Фомин С.Я. Разработка алгоритмической структуры АРМ системы ситуационного управления трубным производством	5

Фомин С.Я. Алгоритмическое обеспечение АРМ поддержки решения задач объемно-календарного планирования трубного производства	7
Чикишев Д.Н., Пожидаева Е.Б. Анализ причин вертикального изгиба переднего конца полосы при горячей прокатке на основе математического моделирования	3
Швыдкий В.С., Фатхутдинов А.Р., Девярых Е.А., Девярых Т.О., Спирин Н.А. К математическому моделированию шахтных печей с плавлением материалов	6

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Баженев О.В. Техничко-технологические и инвестиционные преимущества охлаждения коксового газа посредством использования спиральных конечных газовых холодильников	3
Гончаренко Л.П., Филин С.А., Налесная Е.Е. Механизмы стратегического управления рисками инвестирования в инновационные проекты в металлургической отрасли	1
Кулаков С.М., Мусатова А.И., Баранов П.П., Койнов Р.С. Мультиструктурное моделирование сроков окупаемости проектных решений	10

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Александров А.А., Дашевский В.Я. Влияние хрома на растворимость кислорода в никелевых сплавах, содержащих до 25 % кобальта	11
Антонов А.А., Артемьев А.А., Соколов Г.Н. Структура и свойства абразивностойкого наплавленного сплава системы Fe – Cr – C – Mo – Ti – Ni – B	9
Вольфсон Е.Ф. Эффект Горского (к 80-летию выдающегося открытия В.С. Горского)	5

Ершов С.В., Штода М.Н. Точность моделирования процессов обработки металлов давлением методом конечных элементов	4
Могильников П.С. Особенности влияния уровня исходных изгибных напряжений на их релаксацию при отжиге в аморфном сплаве на основе железа состава $Fe_{78}Ni_8Si_8B_{13}$	11
Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Демин Е.И. Расчет предварительного изгиба полосы при резке на ножницах	2
Писарев С.А., Куренков Д.С., Малышева Т.Я. Особенности поведения магнетитовых руд Ковдорского месторождения в аглопроцессе	5
Табакнов Я.И. Влияние легирующих добавок на степень деформационного старения арматурной стали	11
Филиппова М.В., Перетягко В.Н., Сметанин С.В. Усилия и напряжения при прокатке шара	8
Хмелевская И.Ю., Кавалла Р., Комаров В.С. Формирование наноструктуры никелида титана в результате квази-непрерывной изотермической деформации	1
Чичварин А.В., Тимофеева А.С., Крахт Л.Н., Смирнов А.Н., Игуменова Т.И. Разработка рецептуры композитных наноструктурных гидрофобных покрытий для скрубберов обеспыливания	1

ЮБИЛЕИ

К 85-летию Игоря Борисовича Кекало	4
К 70-летию со дня рождения Бориса Алексеевича Романцева	10
К 85-летию Владимира Николаевича Перетягко	12

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

Памяти Эдуарда Викторовича Козлова	8
Указатель статей, помещенных в 2016 г. Том 59	12

Index of articles

“Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy”

RESOURCE SAVING IN FERROUS METALLURGY

A.A. Alpatova, L.M. Simonyan, N.Sh. Isakova	The study of dust formation during arc melting of zinc-coated steel	5
A.E. Bazegskii, M.B. Shkoller	Process research of coal thermal dissolution in order to obtain the binder for refractory masses. Report 1. Preparation of the binder	8
V.I. Dmitrienko	Features of the application of natural and man-made materials for micro-alloying and modifying of steel	6
O.I. Nokhrina, I.D. Rozhikhina, I.A. Rybenko, I.E. Khodosov	Development of the principles of energy efficient processes of metallization using thermodynamic modeling	4
O.I. Nokhrina, I.D. Rozhikhina, I.E. Khodosov	Manufacture of metallized products with the usage of Kuzbass coals	10
D.I. Orelkina, A.L. Petelin, L.A. Polulyakh, G.S. Podgorodetskii	Calculation model for the concentration of secondary metallurgical emissions into the atmosphere	5
A.V. Pavlov, V.S. Rimoshevskii	Ways of utilization of spent petrochemical molybdenum catalysts	1
A.S. Timofeeva, T.V. Nikitchenko, V.V. Fedina, K.A. Eliseeva	Effect of shock loads on the strength of iron ore pellets	12
E.K. Yakubailik, I.M. Ganzhenko, P.Yu. Butov	Specific magnetic susceptibility of iron ores of Siberian deposits	12

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

G.Zh. Abdykirova, M.Sh. Tanekeeva, A.E. Sydykov, S.B. Dyusenova	Assesment of the possibility of producing of electrolytic manganese dioxide from the purified solutions after manganese sludge leaching	5
N.A. Bogatov, A.A. Bogatov, D.R. Salikhyanov	Investigation of simultaneous deformation of pipes made of dissimilar metals at the production of laminated composite pipe	7
A.A. Borodin, E.G. Kabulova, K.A. Polozhentsev	Method for determining the deviations of technological process for remelting the consumable electrodes in a vacuum arc furnace by the video image ...	5
E.A. Chernyshov, A.A. Evlampiev, A.V. Korolev, L.A. Ivanova, O.V. Moiseeva	Thermomechanical properties of forms on various binders and the forming conditions of high-quality castings	8
M.V. Chukin, M.A. Polyakova, A.E. Gulín	Features of the effect of combining different kinds of plastic deformation on the microstructure grinding and mechanical properties of the carbon wire	8
V.F. Danenko, L.M. Gurevich, E.Yu. Kushkina, E.B. Gladskikh	Extension of the scope of steel compacted strands and ropes made of them	11
A.M. Dubinin, S.P. Mavrin	Optimal parameters of the steam coal gasification in the gasifier with damped circulating fluidized bed	11
A.V. Fedosov	Usage of uneven estimated nets for mathematical modeling of the processes of continuous cast billet formation in a CCM crystallizer	2
A.A. Gerasimova, A.G. Radyuk, A.E. Titlyanov	Creation of wear-resistant layers on the narrow walls of a continuous casting mold with aluminum and chrome-nickel gas-thermal coatings	7
P.A. Gnitiev, A.B. Biryukov	Investigation of lining parameters impact onto metal air-cooling process in chamber furnace	11
S.M. Gorbatyuk, A.A. Shapoval, D.V. Mos'pan, V.V. Dragobetskii	Physical principles of manufacturing of periodic profile bars by vibratory drawing	7
V.A. Ivanova, K.N. Vdovin	Test method for the determination of abrasion strength and abrasive ability of foundry coke	3
Z.K. Kabakov, I.A. Senatova, D.I. Gabelaya	Mathematical modeling of gap formation between billet and mold at steel continuous casting ...	10
E.A. Kharitonov, A.S. Budnikov	Distribution of specific metal forces on the roll at pipe rolling in three-roll screw-rolling mill	9
E.A. Kharitonov, V.P. Romanenko, A.S. Budnikov	Development of calculating method of the deformation parameters during rolling out in a three-roll mill liners of screw rolling	3
A.P. Kolikov, D.Yu. Zvonarev, I.M. Taupek, S.V. Kadil'nikov, M.R. Galimov	Mathematical model of plastic forming of the slab for large diameter welded pipes. Report 1	7

A.P. Kolikov, D.Yu. Zvonarev, I.M. Taupek, S.V. Kadil'nikov, M.R. Galimov	Mathematical model of plastic forming of the slab for large diameter welded pipes. Report 2	9
R.E. Kryukov, Yu.V. Bendre, G.V. Galevskii, N.A. Kozyrev, V.F. Goryushkin	Thermodynamic aspects of hydrogen removal during welding under fluorine-containing fluxes	2
K.B. Laber, H.S. Dyja, A.M. Kawalek, A.A. Bogatov, D.Sh. Nukhov	Influence of temperature and high-speed conditions on resistance of deformation of the carbon low-alloyed steel	9
O.S. Lekhov, E.Yu. Raskatov	Dynamics of H-beam capture by rollers of break-down stand 1300 of the universal-beam mill	4
L.I. Leont'ev, K.V. Grigorovich, M.V. Kostina	Fundamental investigations as the basis of creation of new materials and technologies in metallurgy. Part 1	1
L.I. Leont'ev, M.I. Alymov	Fundamental investigations as the basis of creation of new materials and technologies in metallurgy. Part 2. Powder nanomaterials	5
P.A. Livatkin, K.A. Polozhentsev	Operation with program step for vacuum arc furnace	1
A.D. Lopatenko, D.M. Orekhov, A.E. Semin	Analysis of the technological scheme of pipe steel production to develop the proposals for improving the finished products quality	11
A.V. Loza, V.V. Chigarev, D.A. Rassokhin, V.V. Shishkin	Investigation of the stressed state of cast metal at cyclic heating	11
A.B. Maksimov, V.M. Gulyaev, I.S. Erokhina	The study of damageability of plate steel under cyclic plastic bending	3
V.I. Mulyavko, T.A. Oleinik, V.I. Lyashenko, A.M. Kiri chen ko, M.O. Oleinik	Improving the efficiency of collecting chambers for capture of metallurgical dust	7
S.G. Melamud, B.P. Yur'ev	Study of the oxidation process in iron-ore materials at temperate and high temperatures	6
A.M. Mikhailov, K.A. Zubarev, G.I. Kotel'nikov, A.E. Semin, K.V. Grigorovich	Model of evaporation of the components at the nickel alloys smelting in a vacuum induction furnace	1
A.G. Panov, V.S. Tsepelev, V.V. Konashkov	Research of the possibility of quality improvement of centrifugal casting billets made from cast-iron by processing of melts by alkaline earth metals carbonates ..	1
V.M. Pavlovets, A.V. Gerasimuk	Comparative evaluation of thermal stresses in the capacity of iron-ore pellets with differentiated porosity	8
V.M. Pavlovets	Formation of the structure of iron ore pellets produced using heat-spraying of wet charge	12
A.Yu. Petryshev, I.S. Bersenev, B.A. Bokovikov, Yu.G. Yaroshenko	The research of peculiarities of nitrogen oxides forming at iron ore agglomeration	4
S.S. Pilipenko, M.R. Baiguzin, A.P. Potapenko	Specific work of powers for rolled metal cutting with scissors	8
E.V. Polevoi, M.V. Temlyantsev, A.Y. Suysuykin	Definition of cooling rate along a head section of rails at thermal processing with air ...	8
Yu.S. Postol'nik, V.I. Timoshpol'skii, I.A. Trusova	Analytical calculations of solidification and cooling processes in large-tonnage commercial ingots. Report 2. Thermal conditions of ingot in heat-technological processing chain from casting to feeding to a rolling mill	2
M.Yu. Ryabchikov, V.V. Grebennikova, E.S. Ryabchikova, N.V. Bogdanov	Fracture model of metallurgical sinter	3
A.G. Radyuk, A.E. Titlyanov, T.Yu. Sidorova	Modeling of the thermal state of air tuyeres for blast furnaces	9
S.V. Samusev, G.P. Zhigulev, V.A. Fadeev, K.S. Manakhov	Simulation of forming of pipe billet at specialized forming installation	3
A.S. Savinov	Calculations for the strength of casting at the formation of its cavity by cylindrical rod	1
V.N. Shinkin	Calculation method of steel sheet's geometry under preliminary flattening on seven-roller straightening machine	11
V.N. Shinkin	Calculation of steel sheet's curvature under preliminary flattening on the seven-roller straightening machine	12
V.S. Shvydkii, A.R. Fatkhutdinov, E.A. Devyatykh, T.O. Devyatykh, N.A. Spirin	On mathematical modeling of layer metallurgical furnaces and aggregates. Report 1	9

L.A. Shul'ts On the problems of control and reduction of high-temperature loss of steel in heating furnaces	7
A.N. Smirnov, S.V. Kuberskii, A.V. Golovchanskii, E.N. Maksaev, V.E. Ukhin The research of forming of oscillation tracks on the surface of continuous cast billet	4
E.N. Smirnov, V.A. Sklyar, V.A. Belevitin, R.A. Shmyglya, O.E. Smirnov Development of the study of mechanism of "healing" defects of continuous cast billet axial zone on a physical model	5
M.S. Stepanov, Yu.M. Dombrovskii Thermodynamic analysis of formation reaction of a carbide layer in steel at microarc molybdenum saturation	2
N.V. Telin, N.N. Sinitsyn Evaluation of the temperature conditions of service of metallurgical machinery rolls at scaling	7
Ya.D. Vasilev Mathematical models of yield stress of carbon and alloyed steels in the range of prerecrystallization temperature of deformation	6
K.N. Vdovin, N.A. Feoktistov, E.V. Sinitskii, D.A. Gorlenko, N.A. Durov High-manganese steel smelting in electric arc furnace. Ladle treatment. Report 2	1
K.N. Vdovin, D.A. Gorlenko, N.A. Feoktistov Influence of stacking-fault energy on abrasive wear resistance of castings from Fe – 12Mn – 1,2C steel cooled with different rates	9
Y.G. Yaroshenko, V.S. Shvidkii, N.A. Spirin, V.V. Lavrov Stationary heat exchange in the blast furnace smelting zone irrigated with melt ..	2
Yu.G. Yaroshenko, N.A. Spirin, V.S. Shvydkii, Ya.M. Gordon, V.V. Lavrov Evolution of schemes of heat exchange in a blast furnace	8
B.P. Yur'ev, V.A. Gol'tsev The study of thermal properties of titanium-magnetite Kachkanar pellets	5
S.A. Zagainov, S.V. Filatov, L.Yu. Gileva, A.V. Lozovich, S.O. Jimoh Capability assessment of thermal control of blast furnace upper zone in peripheral area	6
K.A. Zubarev, K.O. Titova, G.I. Kotelnikov, K.V. Grigorovich Analysis of iron reduction from the lining at vacuum smelting of the Ni-Cu alloys	12

RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES IN THE STEEL INDUSTRY

A.E. Anikin, G.V. Galevskii, V.V. Rudneva Carbideization of technogenic microsilica by brown-coal semi-coke	2
--	---

ECOLOGY AND RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES

A.A. Lykasov, G.M. Ryss, D.G. Sharafutdinov, A.Yu. Pogodin Recovery of iron from waste slag of copper industry	9
---	---

PHYSICO-CHEMICAL BASICS OF METALLURGICAL PROCESSES

A.A. Alexandrov, V.Ya. Dashevskii, L.I. Leont'ev Thermodynamics of oxygen solutions in the nickel melts containing aluminum and titanium	7
N.A. Krayushkin, I.A. Pribytkov, K.S. Shatokhin Research of the influence of boundary conditions heterogeneity on the cooling rate of cylindrical billets at CCM	9
E.V. Ovchinnikova, V.B. Gorbunov, A.N. Shapovalov, S.A. Pisarev, N.M. Durov Comparative study of the South Urals magnesium materials behavior at the sintering process temperature	11
A.L. Rudenko Kinetics of interfacial transition of sulfur during ladle refining of iron by magnesium	12
B.A. Rumyantsev, O.A. Komolova, K.V. Grigorovich, A.K. Garber, Ya.I. Tabakov Study of the kinetics of carbon oxidation by argon-oxygen plasma in chromium-containing melts	9
B.A. Rumyantsev, O.A. Komolova, K.V. Grigorovich, A.K. Garber Investigation of the evaporation processes of components of chromium-containing melts by low temperature plasma treatment	11
K.N. Vdovin, D.A. Gorlenko, N.A. Feoktistov Research of the regularities of formation, morphology and chemical composition of the excess phase in cast high-manganese steel	7
A.S. Vusikhis, L.I. Leont'ev, V.P. Chentsov, D.Z. Kudinov, E.N. Selivanov Metallic phase forming in barbotage of multicomponent	

oxide melt by reduction gas Report 1. Theoretical basis of the process	9
B.P. Yur'ev, V.A. Goltsev Study of the magnetite oxidation	10
K.A. Zubarev, G.I. Kotelnikov, K.O. Titova, A.E. Semin, M.A. Mikhailov Prediction of liquidus temperature of nickel-based complex alloyed steels	9

INNOVATIONS IN METALLURGICAL AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES AND MATERIALS

A.A. Bogatov, D.A. Pavlov, E.A. Pavlova FEM simulation of a new method of lengthwise pipe rolling on a stub mandrel with stretch	1
S.P. Eron'ko, E.V. Oshovskaya, M.Yu. Tkachev Investigation and improvement of the rapid change system of submerged nozzle of slab CCM tundish	1
S.V. Krivenko Research of the zonal structure of sintering layer	8
N.A. Kozyrev, N.V. Kibko, A.A. Umanskii, D.A. Titov, A.G. Nikitin Research and development of new compositions of cored wire of C – Si – Mn – Cr – V – Mo system for rolls surfacing	10
A.G. Nikitin, A.V. Abramov, A.A. Gredina, V.V. Garyashin Analysis of crank hinge – radical bearing of crank-beam mechanism of jaw crusher	12
N.N. Ogarkov, E.Yu. Zvyagina, Yu.D. Zaletov, N.N. Khomenko, L.F. Kerimova Increasing the density of peaks microgeometry of automobile sheet due to improvement of the shot-blasting unit design	12
S.S. Pilipenko, M.R. Baiguzin, A.P. Potapenko Development and research of a hydraulic geared-multiplicatory drive with a sectional metering control	10
G.S. Podgorodetskii, A.A. Tretyak, V.B. Gorbunov, L.A. Polulyakh Perspective use of poly-fuel gas generator in practice of blast-furnace shops	12
E.V. Polevoi, G.N. Yunin, M.V. Temlyantsev Development and commercial introduction of technology for differentiated heat treatment of railway rails with rolling heat utilization	10
S.R. Rakhmanov, V.P. Ol'shanskii Features of functioning of the core mechanism of deduction of automatic mandrel mill, taking into account the variability of system mass	2
G.Sh. Rubin, M.V. Chukin, G.S. Gun, M.A. Polyakova Function-target analysis as the method of properties and functions structuring of metalware	10
A.L. Sotnikov Diagnostics of electromechanical drive of the CCM mold oscillation mechanism	5
E.K. Yakubailik, I.M. Ganzhenko, P.Yu. Butov, V.I. Kilin Loss level of magnetite iron at wet separation	6

ECONOMIC EFFICIENCY OF METALLURGICAL PRODUCTION

O.V. Bazhenov Technical, technological and investment benefits of coke gas cooling using spiral final gas cooler	3
L.P. Goncharenko, S.A. Filin, E.E. Nalesnaya Approaches for strategic risk management of investments in innovative projects in metallurgical industry	1
S.M. Kulakov, A.I. Musatova, P.P. Baranov, R.S. Koinov Multistructural simulation of payback period of project decisions	10

SUPERDUTY STEEL

A.M. Avdeenko, V.G. Molyarov, A.V. Kalashnikova, A.N. Bocharov, A.V. Molyarov High-technology nitrogen-alloyed constructional bimetal material with increased strength	11
L.M. Kaputkina, A.G. Svyazhin, I.V. Smarygina, T.V. Bobkov Corrosion resistance in different media of high-strength austenitic nitrogenous chromium-manganese steel	9
L.L. Lyubimova, A.A. Makeev, A.S. Zavorin, A.A. Tashlykov Estimation of the stress state at elastic-plastic deformation of austenitic chromium-manganese heat-resistant steel	12
A.N. Smirnov, E.V. Kozlov, M.V. Radchenko, K.V. Knyaz'kov, V.L. Knyaz'kov Structural-phase state of coatings of the system of Ni – Cr – B – Si – Fe/WC after plasma-powder surfacing with the usage of nanopowders	4

- V.S. Tsepelev, A.M. Povodator, V.I. Grokhovskii, V.V. V'yukhin The investigation of physical properties of «iron» meteorite melts 6

MATERIAL SCIENCE

- V.V. Akimov, A.F. Mishurov, E.V. Akimova Heat resistance of tungsten-free TiC – TiNi hard alloys in dependence on volumetric compound of composition at heating up to high temperatures 10
- S.A. Barannikov, A.V. Bochkareva, A.G. Lunev, G.V. Shlyakhova, L.B. Zuev Ultrasound velocity variation at plastic deformation of high-chromium steel 8
- S.A. Barannikova, Yu.F. Ivanov, D.A. Kosinov, S.V. Kononov, V.E. Gromov Effect of hydrogen on the localization of plastic deformation and structure of the electrolytically saturated low-carbon steel 2
- S.A. Barannikova, D.A. Kosinov, L.B. Zuev, V.E. Gromov, S.V. Kononov Hydrogen effect on macrolocalization of plastic deformation of low carbon steel 12
- V.P. Dement'ev, S.V. Feiler, D.V. Boikov, N.A. Kozyrev, E.V. Polevoi Results of the use of import rails in the East Siberian Railway 6
- V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, K.V. Morozov, O.A. Peregudov, A.B. Yur'ev Physical nature of rails strengthening during long operation 6
- D.I. Ivanov, A.A. Kozhukhov, L.F. Urazova Mechanism of high-temperature corrosion of heat-resistant chromium-nickel steel 3
- Yu.F. Ivanov, K.V. Morozov, O.A. Peregudov, V.E. Gromov Rail steel operation: degradation of structure and properties of surface layer ... 8
- A.A. Khlybov, A.L. Uglov The research of accumulation of fatigue damage in samples of 08Cr18Ni10Ti steel at low-cycle fatigue 3
- N.V. Koptseva, Yu.Yu. Efimova, O.A. Nikitenko, M.P. Baryshnikov, M.S. Zharebtsov Ultrafine-grained structure formation in carbon steel by high-speed compression deformation at increased temperatures 2
- N.A. Kozyrev, N.V. Kibko, A.A. Umanskiy, D.A. Titov, L.P. Bashchenko Improving the composition of flux-cored wires of C – Si – Mn – Cr – W – V system in order to increase the quality and performance of the deposited layer 11
- S.S. Kuzovov, K.V. Makarenko, N.A. Zhizhkina Research methods for «hot crack» defects 11
- M.L. Lobanov, G.M. Rusakov, A.A. Redikul'tsev, M.V. Karabanalov, L.V. Lobanova Special borders in the secondary recrystallization ... 6
- V.I. Murav'ev, P.V. Bakhmatov, N.O. Pletnev, A.A. Debelyak Effect of stress state on the structure and properties of constructions of steels and alloys at welding 4
- V.V. Murav'ev, S.V. Len'kov, A.I. Dedov, A.V. Baiteryakov, A.Yu. Kotolomov Influence of single-axis tension of 09G2S steel samples after different thermal treatment on acoustic structural noises 2
- N.I. Noskova, R.V. Churbaev, Yu.I. Filippov Nanocrystalline thin-layer composite coatings: production, structure and properties 4
- O.A. Peregudov, V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, K.V. Morozov, S.V. Kononov Formation of structure-phase states in rails of high quality class 4
- V.D. Sarychev, V.E. Gromov, S.A. Nevskii, A.I. Nizovskii, S.V. Kononov Nanolayers formation at hydrodynamic instability development under the external energy effects 10
- V.D. Sarychev, B.B. Khaimzon, S.A. Nevskii Modeling of niobium dissolution process in iron at electric arc welding 8
- V.V. Stolyarov The role of chemical and phase composition in electroplastic effect occurrence 6
- A.S. Simachev, T.N. Oskolkova, M.V. Temlyantsev Influence of non-metallic inclusions in rail steel on its high-temperature plasticity 2
- S.V. Vorob'ev Increase of fatigue life of steels of different structure classes by electron beam treatment 4
- A.G. Tyagunov, V.V. V'yukhin, G.V. Tyagunov, E.E. Baryshev, Yu.N. Akshentsev Effect of chromium concentration on the structure formation process of liquid chrome-nickel alloys 8

INFORMATION TECHNOLOGIES
AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

- D.N. Chikishev, E.B. Pozhidaeva Analysis of the causes of vertical bending of the strip front end at hot rolling on the basis of mathematical modeling 3

- A.V. Eremin, E.V. Stefanyuk, L.S. Abisheva Heat source identification based on analytical solutions of the heat-conduction problem 5
- S.Ya. Fomin Development of the algorithmic structure ARM of situational control system of pipe production 5
- S.Ya. Fomin Algorithmic maintenance of WKS support for volume scheduling in pipe production 7
- A.G. Ivashko, M.S. Tsyganova, R.I. Nabatov The study of decomposition kinetics of supercooled austenite of powder steels with different porosity by simulation modeling 3
- O.V. Kiryakova, L.A. Lapina, S.V. Kapustina On the approach to the development of information control system of technological metallurgical objects 4
- A.V. Medvedev, M.E. Kornet, E.A. Chzhan On nonparametric modeling algorithms of BOF process 12
- L.P. Myshlyayev, D.A. Ageev, S.V. Chernyavskii Control of the final blowing period of oxygen-converter steel melting with model identification 2
- Yu.S. Postol'nik, V.I. Timoshpol'skii, I.A. Trusova Blank heating in metallurgical furnaces based on a theoretical counterflow model 10
- P.A. Sechenov, V.P. Tsymbal Simulation modeling of gravity separator in a column jet-emulsion reactor 4
- V.S. Shvydkii, A.R. Fatkhutdinov, E.A. Devyatykh, T.O. Devyatykh, N.A. Spirin Mathematical design of the shaft furnaces with materials melting 6
- S.V. Soshkin, A.L. Rutkovskii, G.S. Soshkin, E.I. Meshkov, M.A. Kovaleva Development and comparative analysis of mathematical models of forming of electrode production quality at burning 3
- V.I. Timoshpol'skii On the theory of counterflow heating of thermally massive bodies by radiation and convection simultaneously 7

BRIEF COMMUNICATION

- A.V. Chichvarin., A.S. Timofeeva, L.N. Krakht, A.N. Smirnov, T.I. Igumenova Development of formulations of composite nanostructured hydrophobic coatings for dedusting scrubbers 1
- I.Yu. Khmelevskaya, R. Kavalla, V.S. Komarov Formation of nanostructure in titanium nickelide as a result of quazi-continuous isothermal deformation 1
- A.G. Nikitin, Yu.A. Epifantsev, E.I. Demina Calculation of preliminary bending of strip during cutting by shear 2

SHORT REPORTS

- A.A. Aleksandrov, V.Ya. Dashevskii Effect of chromium on the oxygen solubility in nickel alloys containing up to 25 % of cobalt 11
- A.A. Antonov, A.A. Artem'ev, G.N. Sokolov Structure and properties of the welded wear resistant alloy of Fe – Cr – C – Mo – Ni – Ti – B system 9
- S.V. Ershov, M.N. Shtoda Precision of modeling of metal forming by finite elements method 4
- M.V. Filippova, V.N. Peretyat'ko, S.V. Smetanin Stresses and strains during rolling of the ball 8
- P.S. Mogil'nikov Features of the initial bending stresses influence on the relaxation process during annealing in amorphous iron-based Fe₇₈Ni₁Si₈B₁₃ alloy 11
- S.A. Pisarev, D.S. Kurenkov, T.Ya. Malysheva Behavior of magnetite ores of Kovdor deposit in sintering process 5
- Ya.I. Tabakov Effect of alloying elements on the degree of strain aging of reinforcing steel 11
- E.F. Vol'fson To the 80th Anniversary of the famous opening of V.S. Gorskii 5
- To the memory of Eduard Viktorovich Kozlov 8

ANNIVERSARIES

- To the 85th Anniversary of I.B. Kekalo 4
- To the 70th Anniversary of Boris Alekseevich Romanov 10
- To the 85th Anniversary of V.N. Peretyat'ko 12

- Index of articles "Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya Ferrous Metallurgy" for 2016. Vol. 59 12

Над номером работали:

Леонтьев Л.И., главный редактор

Протопопов Е.В., заместитель главного редактора

Ивани Е.А., заместитель главного редактора

Олендаренко Н.П., заместитель ответственного секретаря

Потапова Е.Ю., заместитель главного редактора по развитию

Бащенко Л.П., ведущий редактор

Неунывахина Д.Т., ведущий редактор

Расенец В.В., верстка, иллюстрации

Кузнецов А.А., системный администратор

Острогорская Г.Ю., менеджер по работе с клиентами

Подписано в печать 22.12.2016. Формат 60×90 ¹/₈. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,25. Заказ 5271. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСиС.
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4.
Тел./факс: (499) 236-76-17, 236-76-35