

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

№ 12, 2015

Издается с января 1958 г. ежемесячно

Том 58

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:

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)

ВОЛЫНКИНА Е.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

ГОРБАТЮК С.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ГРИГОРОВИЧ К.В., редактор раздела «Ресурсосбережение в черной металлургии» (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

ГРОМОВ В.Е. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

ДУБ А.В., редактор раздела «Инжиниринг в черной металлургии» (Госкорпорация «Росатом», г. Москва)

КАВАЛЛА Р. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

КОЛОКОЛЬЦЕВ В.М. (Магнитогорский государственный технический университет, г. Магнитогорск)

КОСЫРЕВ К.Л., редактор раздела «Металлургические технологии» (ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина», г. Москва)

КУРНОСОВ В.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ЛАЗУТКИН С.С. (ГК «МетПром», г. Москва)

МЫШЛЯЕВ Л.П., редактор раздела «Информационные технологии и автоматизация в черной металлургии» (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

НИКУЛИН С.А. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ПОДГОРОДЕЦКИЙ Г.С. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ПЫШМИНЦЕВ И.Ю., редактор раздела «Высокопрочные стали для энергетики» (Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности, г. Челябинск)

СИМОНЯН Л.М., редактор раздела «Рациональное природопользование в черной металлургии» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

СОЛОДОВ С.В. (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 и нанотехнологии» (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@misis.ru
www.fermet.misis.ru

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

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

IZVESTIYA

VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA

IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY

Editor-in-Chief: LEONTE'V L.I.
(Russian Academy of Sciences, Moscow)

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

Responsible Secretary: POLULYAKH L.A.
(National Research Technological University "MISIS", Moscow)

Deputy Responsible Secretary: OLENDARENKO N.P.
(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

Editorial Board:

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

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

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

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

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

GRIGOROVICH K.V., Editor of the section "Resources Saving in Ferrous Metallurgy" (Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow)

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

DUB A.V., Editor of the section "Engineering in Ferrous Metallurgy" (State Corporation "Rosatom", Moscow)

KAVALLA R. (National Research Technological University "MISIS", Moscow)

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

KOSYREV K.L., Editor of the section "Metallurgical Technologies" (FSUE "TsNIIChernmet named after Bardin I.P.", Moscow)

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

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

MYSHLYAEV L.P., Editor of the section "Information Technologies and Automatic Control in Ferrous Metallurgy" (Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

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

PODGORODETSKIY G.S. (National Research Technological University "MISIS", Moscow)

PYSHMINTSEV I.YU., Editor of the section "High-strength Steel for Power Engineering" (Russian Research Institute of the Pipe Industry, Chelyabinsk)

SIMONYAN L.M., Editor of the section "The Rational Use of Natural Resources in the Steel Industry" (National Research Technological University "MISIS", Moscow)

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

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

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

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

FILONOV M.R., Editor of the section "Materials Science and Nanotechnologies" (National Research Technological University "MISIS", Moscow)

SPAIDEL' M. (Swiss Academy of Materials, Switzerland)

YUR'EV A.B. (OJSC "EVRAZ WSMP", 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@misis.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

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Меламуд С.Г., Юрьев Б.П.** Методика расчета напряжений в обожженных железорудных окатышах при их охлаждении 865
- Рожихина И.Д., Нохрина О.И., Дмитриенко В.И., Платонов М.А.** Модифицирование стали барием и стронцием 871
- Михайлов Г.Г., Макровец Л.А., Смирнов Л.А.** Термодинамическое моделирование процессов взаимодействия лантана с компонентами металлических расплавов на основе железа ... 877
- Якушевич Н.Ф., Полях О.А., Галевский Г.В.** Термодинамические равновесия в системе кремнистый сплав–шлак–газ 884
- Токовой О.К., Шабуров Д.В.** Исследование неметаллических включений в вакуумированной аустенитной нержавеющей стали методом растровой электронной микроскопии 890
- Калиногорский А.Н., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Фейлер С.В., Багрянцев В.И.** Исследование особенностей применения вихревых технологий для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров. Сообщение 2. Характеристики и параметры движения капель шлака 809

РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

- Павлович Л.Б., Коротков С.Г., Осокина А.А.** Оценка экологического риска от производственной деятельности металлургического комбината 901

ИНЖИНИРИНГ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

- Савельев А.Н., Кипервассер М.В., Аниканов Д.С.** Диагностика аварийных режимов ленточных транспортеров в горно-металлургической промышленности 906

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

- Башков О.В., Муравьев В.И., Лончаков С.З., Фролов А.В.** Исследование дефектов–концентраторов напряжений по параметрам акустической эмиссии в процессе развития повреждений 912
- Сосков А.А., Полетаев Г.М., Старостенков М.Д.** Исследование особенностей миграции точечных дефектов в упорядоченном сплаве CuPt в условиях деформации 919

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

- Циряпкина А.В., Мышляев Л.П., Ивушкин К.А., Грачев В.В.** Классификация объектов с рециклом и анализ влияния неопределенностей моделей на эффективность САР этих объектов 925
- К 70-летию А.М. Глезера** 932
- Указатель статей, помещенных в 2015 г. Том 58** 933

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 12

CONTENTS

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- S.G. Melamud, B.P. Yur'ev** Calculation methods of tensions in burnt iron-ore pellets at their cooling 865
- I.D. Rozhikhina, O.I. Nokhrina, V.I. Dmitrienko, M.A. Platonov** Modification of steel by barium and strontium 871
- G.G. Mikhailov, L.A. Makrovets, L.A. Smirnov** Thermodynamic modeling of lanthanum interaction processes using iron-based metallic melts 877
- N.F. Yakushevich, O.A. Polyakh, G.V. Galevskii** Thermodynamic equilibrium in the system silicon alloy–slag–gas 884
- O.K. Tokovoi, D.V. Shaburov** The research of nonmetallic inclusions in vacuum-degassed austenitic stainless steel by the method of scanning electron microscopy 890
- A.N. Kalinogorskii, E.V. Protopopov, A.G. Chernyatevich, S.V. Feiler, V.I. Bagryantsev** Application of vortex technologies of refractory coating formation for converter lining. Report 2. Features and movement parameters of slag drops 809

THE RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES IN FERROUS METALLURGY

- L.B. Pavlovitch, S.G. Korotkov, A.A. Osokina** The estimation of ecological risk of production activities of metallurgical plant 901

ENGINEERING IN FERROUS METALLURGY

- A.N. Savel'ev, M.V. Kipervasser, D.S. Anikanov** The assessment of power changes in motor parameters in case of emergencies in the mechanical part of belt conveyor 906

MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES

- O.V. Bashkov, V.I. Murav'ev, S.Z. Lonchakov, A.V. Frolov** The research of defects – stress concentrators by the acoustic emission parameters at the process of damage development 912
- A.A. Soskov, G.M. Poletaev, M.D. Starostenkov** The study of features of point defects migration in CuPt ordered alloy in the conditions of deformation 919

INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

- A.V. Tsiryapkina, L.P. Myshlyayev, K.A. Ivushkin, V.V. Grachev** Classification of objects with recycle and impact analysis of models uncertainty on effective management systems of these objects .. 925
- To the 70th Anniversary of A.M. Glezer** 932
- Index of articles “Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy” for 2015. Vol. 58** 933

УДК 669.052.42:539.016

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЙ В ОБОЖЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШАХ ПРИ ИХ ОХЛАЖДЕНИИ

Меламуд С.Г., к.т.н., зам. директора учебно-проектного центра

«Проектный институт УРФУ» (e1944 @yandex . ru)

Юрьев Б.П., к.т.н., доцент кафедры теплофизики и информатики

в металлургии (yurev-b@mail . ru)

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Предложена методика расчета напряжений в обожженных зональных окисленных окатышах на основе возникновения при их охлаждении напряженного состояния на границе зон с разной температурой кристаллизации шлаковых включений. Проведены расчеты напряженного состояния для качканарских окатышей с разным расположением гематитовых и магнетитовых зон. Показано, что при охлаждении обожженных зональных окатышей на воздухе на границе магнетитового ядра и гематитовой оболочки возникают растягивающие нормальные напряжения в радиальном направлении, способствующие отрыву ядра от оболочки. Установлено, что наличие трехзонной структуры окатышей (магнетитовое ядро – гематитовая оболочка – поверхностная магнетитовая пленка) способствует перераспределению нормальных напряжений по их сечению. Увеличение толщины поверхностной магнетитовой пленки уменьшает растягивающие напряжения в радиальном направлении на границе ядра и оболочки, в результате чего прочность окатышей повышается. При охлаждении обожженных окатышей с гематитовым ядром и магнетитовой оболочкой в нейтральной атмосфере на границе зон возникают растягивающие нормальные напряжения в тангенциальном направлении, способствующие снижению прочности окатышей.

Ключевые слова: методика, зональные окатыши, напряжение, прочность, охлаждение, атмосфера, магнетитовые и гематитовые зоны, структура, режимные параметры.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-865-870

Для получения полностью окисленных железорудных магнетитовых окатышей по всему объему и с однородной структурой необходимы низкие скорости нагрева и температуры не выше 1000 °С. В реальных условиях это приведет к увеличению продолжительности процесса обжига, низкой производительности обжиговых конвейерных машин и значительному увеличению их размеров. В результате сам процесс производства окатышей окажется экономически нецелесообразным. Поэтому в промышленных условиях обжиг окатышей ведут при температурах выше 1000 °С (1250 – 1350 °С) и скорости нагрева 100 °С/мин и выше. При таких параметрах обжига окатыши, как правило, имеют зональное строение [1 – 7]: магнетитовое ядро и гематитовую оболочку, т.е. ярко выраженное двухфазное строение. При охлаждении обожженных частично окисленных зональных окатышей в газовой атмосфере, близкой к нейтральной, гематит также диссоциирует с поверхности. В результате структура окатышей получается трехзонной: магнетитовое ядро – гематитовая оболочка – поверхностная магнетитовая пленка.

При охлаждении таких зональных окатышей в результате разницы температурных интервалов затвердевания шлаковых связей в гематитовой оболочке и магнетитовом ядре возникают напряжения (напряженное состояние), которые приводят к появлению концентри-

ческих трещин на границе раздела фаз и к частичному снижению прочности.

Чтобы произвести ориентировочные расчеты напряженного состояния обожженных зональных окатышей, их сложную структуру рассматривали как двухкомпонентную модель: сферическое ядро и оболочка (рис. 1).

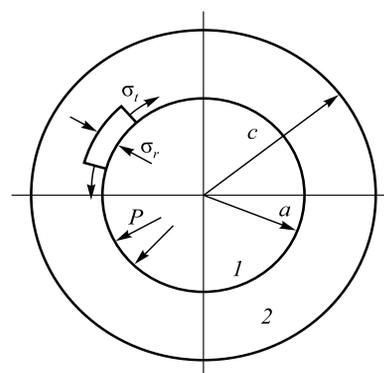


Рис. 1. Схема структурного элемента: c – радиус элемента; a – радиус ядра; P – равномерное давление на границе ядра (1) и оболочки (2); σ_r и σ_t – нормальные напряжения в радиальном и тангенциальном направлениях

Fig. 1. Scheme of the structural element: c – radius of the element; a – radius of the nucleus; P – uniform pressure on the border of the nucleus (1) and the blanket (2); σ_r and σ_t – normal stress in radial and tangential directions

Допускается, что после высокотемпературного обжига зональных окатышей в результате жидкофазного спекания магнетитовое ядро и гематитовая оболочка имеют плотную структуру. В результате разницы температурных интервалов затвердевание шлаковых связей в гематитовой оболочке и магнетитовом ядре при охлаждении в системе возникает разность деформаций [8 – 11]:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2, \quad (1)$$

где ε_1 и ε_2 – свободные относительные усадки магнетитового ядра и гематитовой оболочки соответственно.

В рассматриваемом случае $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$. Так как ядро не может свободно изменять свой размер, на поверхности соприкосновения его с оболочкой возникает равномерное давление, которое определяется из уравнения равновесия элемента шара (рис. 1) в радиальном направлении [10], т.е.

$$\Delta\varepsilon = \frac{P}{E_1}(1 - 2\mu_1) = \frac{1}{E_2} \left\{ \frac{P(2a^3 + c^3)}{2(c^3 - a^3)} - \mu_2 \left[\frac{P(2a^3 + c^3)}{2(c^3 - a^3)} - P \right] \right\}, \quad (2)$$

где P – давление, Па; E_1 и E_2 – модули упругости ядра и оболочки, Па; μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона для ядра и оболочки; a и c – внутренний и наружный радиусы оболочки, м, причем $c > a$.

Для нашего случая имеем

$$P = \Delta\varepsilon/B,$$

где

$$B = \frac{1}{E_1}(1 - 2\mu_1) + \frac{1}{2E_2} \left(\frac{2a^3 + c^3 + \mu_2 c^3 - \mu_2 4a^3}{c^3 - a^3} \right). \quad (3)$$

Для определения нормальных напряжений в сферической оболочке на расстоянии R от центра системы использовали решение задачи Ляме [10] для полой сферы, находящейся под действием внутреннего равномерного давления:

$$\sigma_r^{(2)} = \frac{Pa^3}{c^3 - a^3} \left(\frac{c^3}{R^3} - 1 \right), \quad \sigma_t^{(2)} = -\frac{Pa^3}{c^3 - a^3} \left(1 + \frac{c^3}{2R^3} \right),$$

где $\sigma_r^{(2)}$, $\sigma_t^{(2)}$ – нормальные напряжения в радиальном и тангенциальном направлениях для оболочки, Па.

Для случая $R = a$ нормальные напряжения достигают наибольших величин на внутренней поверхности оболочки, т.е.

$$\left(\sigma_r^{(2)} \right)_{\max} = +P; \quad \left(\sigma_t^{(2)} \right)_{\max} = -\frac{P(2a^3 + c^3)}{2(c^3 - a^3)}, \quad (4)$$

и на внешней оболочке ядра

$$\left(\sigma_r^{(1)} \right)_{\max} = +P; \quad \left(\sigma_t^{(1)} \right)_{\max} = +P, \quad (5)$$

где $\sigma_r^{(1)}$ и $\sigma_t^{(1)}$ – нормальные напряжения в радиальном и тангенциальном направлениях для ядра, Па; знак «–» соответствует сжимающим напряжениям, знак «+» – напряжениям при растяжении.

Уравнения (4) и (5) справедливы для упругой области деформаций. В нашем случае процессы кристаллизации шлаковых составляющих окисленной оболочки и неокисленного ядра в окатышах протекают в температурном интервале 1200 – 900 °С. При этом наблюдается неупругая деформация окатыша в целом.

Поэтому для расчетов напряженного состояния использовали модуль перехода (S) от упругой деформации к неупругой [12]:

$$S = \frac{E\tau}{2\eta(1 + \mu)},$$

где τ – продолжительность неупругой деформации, с; η – эффективная динамическая вязкость материала при его неупругой деформации, Па·с.

Величину неупругой деформации за время τ рассчитывали по формуле

$$d_\tau = Sd_e,$$

где d_e – значение упругой деформации.

В этом случае выражение для параметра B в уравнении (3) запишется в виде

$$B = \frac{\tau_1(1 - 2\mu_1)}{2\eta_1(1 + \mu_1)} + \frac{\tau_2}{4\eta_2(1 + \mu_2)} \times \left[\frac{2a^3 + c^3 + \mu_2 c^3 - \mu_2 4a^3}{c^3 - a^3} \right], \quad (6)$$

где τ_1 и τ_2 – продолжительность неупругой деформации ядра и упругопластической деформации оболочки, с; μ_1 и μ_2 – эффективная динамическая вязкость материала ядра и оболочки, Па·с.

В температурном интервале охлаждения окатыша, в котором происходит одновременно неупругая деформация ядра и оболочки, возникающие напряжения в основном релаксируются за счет подвижности структурных составляющих [13, 14]. Напряженное состояние в зональных окатышах при их охлаждении возникает с момента завершения кристаллизации шлаковой составляющей гематитовой оболочки, которая переходит в упругопластическое состояние и в дальнейшем незначительно изменяет свои размеры. В то же время неупругая деформация неокисленного ядра растет со временем охлаждения до полного отвердевания шлаковой составляющей. При этом величина неупругой деформации неокисленного ядра больше упругопластической деформации окисленной оболочки, что и яв-

ляется причиной возникновения напряженного состояния в зональном окатыше.

Полученные количественные значения эффективной вязкости и усадки окисленных и неокисленных брикетов из офлюсованного качканарского титаномагнетитового концентрата в температурном интервале 1300 – 900 °С послужили основанием для ориентировочных расчетов напряженного состояния в окатышах с разными расположением и соотношением магнетитовых и гематитовых зон.

На рис. 2 показаны результаты расчета равномерного давления P на границе зон для температур охлаждения в интервале 1180 – 1050 °С при разных соотношениях размеров окатыша c и магнетитового ядра a . Видно, что при уменьшении температуры давление P возрастает. Причем при изменении соотношения c/a от 1,2 до 4,0 давление P при температуре 1050 °С возрастает от $20 \cdot 10^7$ до $60 \cdot 10^7$ Па.

С учетом полученных значений P рассчитаны максимальные напряжения в гематитовой оболочке по формуле (4). Изменение максимальных нормальных напряжений в радиальном и тангенциальном направлениях в гематитовой оболочке с увеличением соотношения c/a для температуры 1100 °С приведено на рис. 3. При относительно тонкой оболочке ($c/a = 1,0 - 1,1$) в ней наблюдаются большие сжимающие тангенциальные и незначительные растягивающие радиальные напряжения. Лишь при объемном содержании гематитовой оболочки, составляющем 75 % и более ($c/a \geq 1,6$), тангенциальные напряжения в оболочке меньше радиальных.

Согласно кинетическим закономерностям окисления качканарских окатышей при скоростях нагрева 1,7 °С/с и выше до температур 1270 – 1340 °С степень

их зонального окисления составляет 70 – 85 % [10]. При этом соотношение c/a в окатышах равно 1,5 и более. Поэтому при охлаждении обожженных гранул и наблюдается отслоение магнетитового ядра от гематитовой оболочки под действием растягивающих радиальных напряжений (рис. 3), значения которых превышают пределы прочности наиболее прочных фаз, существующих в окатышах.

Так как величина напряжений в зональном окатыше зависит в основном от параметров $\Delta\epsilon$, η_1 и η_2 , уменьшение в нем количества шлаковой связки, а также сближение температурных интервалов кристаллизации шлаковых составляющих различных зон окатыша будут способствовать снижению напряжений. Ориентировочные расчеты показали, что после охлаждения зонального окатыша гематитовая оболочка находится под действием сжимающих тангенциальных и растягивающих радиальных напряжений, а магнетитовое ядро – под действием растягивающих тангенциальных и радиальных напряжений. Изменение напряжений по толщине окисленной оболочки зонального окатыша показано на рис. 4, а. Максимальные напряжения (σ_r и σ_t) наблюдаются на внутренней поверхности оболочки, величина их уменьшается по ее толщине.

Двухзонные окатыши получают и при использовании бескислородной газовой среды во время высокотемпературного обжига и охлаждения предварительно окисленных окатышей. При этом структура обожженных окатышей состоит из гематитового ядра и магнетитовой оболочки. Рассмотрим механизм возникновения напряженного состояния в таких окатышах.

Офлюсованные качканарские окатыши с магнетитовой оболочкой и гематитовым ядром (рис. 4, б) получали путем полного предварительного окисления на

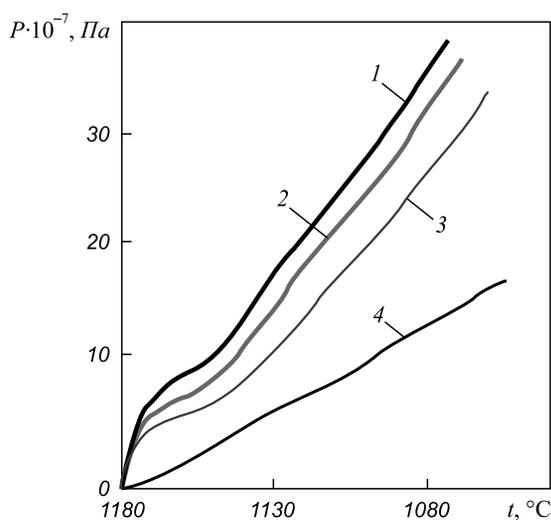


Рис. 2. Изменение равномерного давления P на границе магнетитового ядра и гематитовой оболочки при охлаждении окатышей, имеющих разные соотношения $c/a - 4,0; 2,0; 1,5$ и $1,2$ (кривые 1 – 4)

Fig. 2. Change of uniform pressure P on the border of magnetite nucleus and hematite blanket when cooling pellets, having different correlation $c/a - 4,0; 2,0; 1,5$ and $1,2$ (curves 1 – 4)

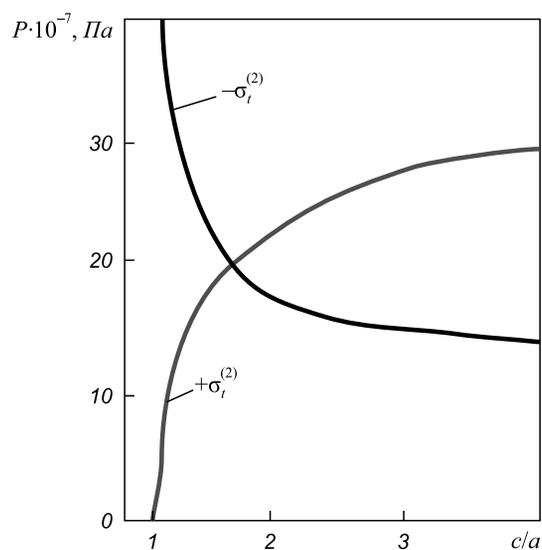


Рис. 3. Зависимость максимальных напряжений в гематитовой оболочке окатышей от соотношения c/a при температуре 1100 °С

Fig. 3. Dependence of maximum stress in a hematite blanket of pellets on the correlation c/a at the temperature of 1100 °С

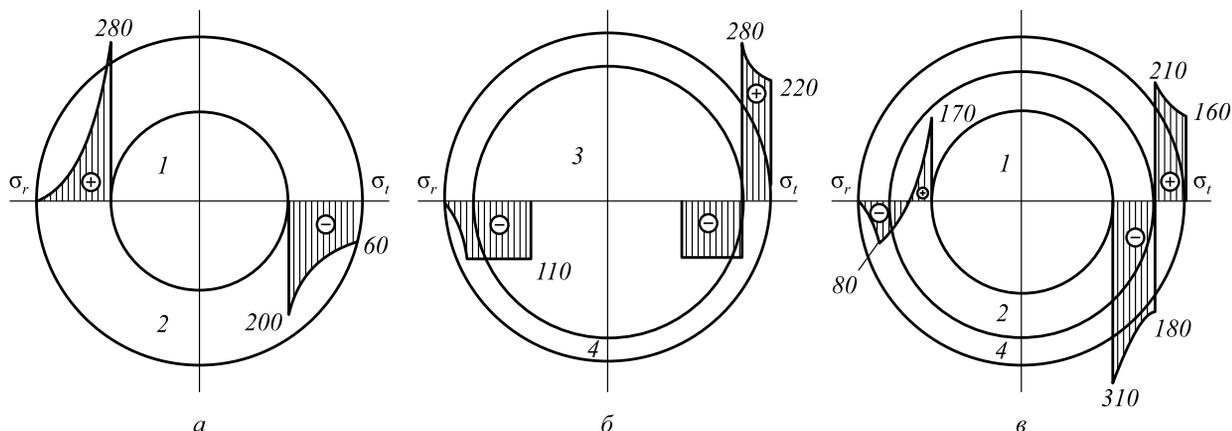


Рис. 4. Распределение напряжений (цифры у экстремума на эпюре напряжений – $\sigma_i \cdot 10^{-7}$, Па) в двух (а, б) и трехзонных (в) окатышах: 1 – магнетитовое ядро; 2 – гематитовая оболочка; 3 – гематитовое ядро; 4 – поверхностная магнетитовая пленка

Fig. 4. Stress distribution (numbers by the extremum on the stress distribution diagram – $\sigma_i \cdot 10^{-7}$, Pa) in two- (a, b) and three-zonal (c) pellets: 1 – magnetite nucleus; 2 – hematite blanket; 3 – hematite nucleus; 4 – surface magnetite film

воздухе при температуре 1300 – 1350 °С и охлаждали в нейтральной среде. Высокая температура обжига и бескислородная среда способствуют диссоциации гематита в окатыше, причем процесс диссоциации преимущественно протекает с поверхности в глубь окатыша с образованием магнетитовой оболочки. При охлаждении в результате разной температуры кристаллизации шлаковых составляющих магнетитовой оболочки и гематитового ядра в окатыше возникает напряженное состояние. Так как магнетитовая оболочка переходит в упругопластическое состояние при более низкой температуре, чем гематитовое ядро, т.о. в этом случае на границе ядра и оболочки возникает сжимающее давление P , равное [10]

$$-P = \Delta \epsilon / B,$$

где

$$B = \frac{\tau_2(1-2\mu_2)}{2\eta_2(1+\mu_2)} + \frac{\tau_1}{4\eta_1(1+\mu_1)} \times \left[\frac{2b^3 + c^3 + \mu_1 c^3 - 4\mu_1 b^3}{c^3 - b^3} \right], \quad (7)$$

где b – радиус гематитового ядра.

В этом случае максимальные напряжения на внутренней поверхности магнетитовой оболочки и на внешней поверхности гематитового ядра составят

$$\left(\sigma_r^{(1)}\right)_{\max} = -P; \quad \left(\sigma_t^{(1)}\right)_{\max} = \frac{P(2b^3 + c^3)}{2(c^3 - b^3)}; \quad (8)$$

$$\left(\sigma_r^{(2)}\right)_{\max} = -P; \quad \left(\sigma_t^{(2)}\right)_{\max} = -P. \quad (9)$$

На основе соотношений (7) – (9) рассчитаны значения давления P на границе магнетитовой оболочки и гематитового ядра, а также возникающие при этом напряжения. Полученные зависимости давления P

от температуры охлаждения в интервале температур 1180 – 1050 °С позволили установить, что сжимающее давление P на границе зон в окатыше возрастает с понижением температуры. При 1050 °С давление P возрастает от $27 \cdot 10^7$ до $48 \cdot 10^7$ Па при увеличении соотношения c/b в окатыше от 1,2 до 4,0. Наличие давления P приводит к возникновению растягивающих нормальных напряжений в тангенциальном и сжимающих в радиальном направлениях в магнетитовой оболочке, а также сжимающих нормальных напряжений в тангенциальном и радиальном направлениях в гематитовом ядре (рис. 4, б). Максимальные нормальные напряжения в магнетитовой оболочке наблюдаются на ее внутренней поверхности и уменьшаются в направлении к ее внешней поверхности.

Установлено, что при соотношении $c/b = 1,6$ и менее, величина растягивающих нормальных напряжений в тангенциальном направлении больше сжимающих напряжений в радиальном направлении. В этом случае наблюдается растрескивание магнетитовой оболочки.

При расчетах напряженного состояния в окатышах с трехзонной структурой предполагали, что распределение нормальных напряжений в трехзонном окатыше (рис. 4, в) равно алгебраической сумме соответствующих нормальных напряжений в двухзонных окатышах: магнетитовое ядро – гематитовая оболочка (рис. 4, а) и гематитовое ядро – магнетитовая оболочка (рис. 4, б).

Результаты расчетов напряжений (рис. 5) выявили изменение растягивающих нормальных напряжений в радиальном и сжимающих нормальных напряжений в тангенциальном направлении, возникающих на границе магнетитового ядра и гематитовой оболочки, в зависимости от соотношения c/a в окатыше при образовании на его поверхности магнетитовой пленки разной толщины h .

При увеличении соотношения c/a в окатыше снижаются напряжения σ_t и возрастают напряжения σ_r .

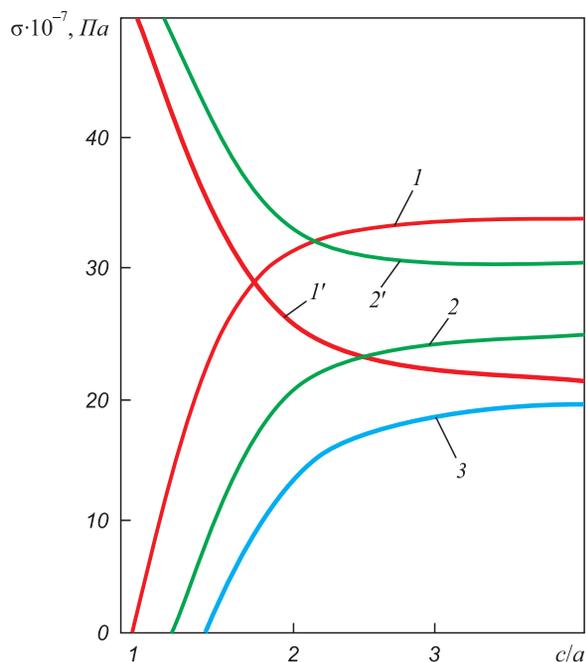


Рис. 5. Зависимость максимальных напряжений в гематитовой оболочке окатышей от соотношения c/a при температуре 1100 °С: 1, 2, 3 – растягивающие нормальные напряжения в радиальном направлении для двух- (1) и трехзонного (2, 3) окатышей при $h = 1$ и $h = 2$ мм соответственно; 1' и 2' – сжимающие нормальные напряжения в тангенциальном направлении соответственно для двух- и трехзонного окатышей при $h = 1$ мм

Fig. 5. Dependence of maximum stress in hematite blanket of pellets on the correlation c/a at the temperature of 1100 °С: 1, 2, 3 – tensile normal stress in a radial direction for two- (1) and three-zonal (2, 3) pellets at $h = 1$ and $h = 2$ mm correspondingly; 1' and 2' – compression normal stress in a tangential direction correspondently for two- and three-zonal pellets at $h = 1$ mm

Увеличение параметра h способствует уменьшению растягивающих σ_r и увеличению сжимающих σ_t напряжений на границе ядра и оболочки при соответствующих значениях c/a . Растягивающие нормальные напряжения, являющиеся основной причиной образования трещин в окатыше, уменьшаются, поэтому прочностные характеристики обожженных окатышей должны возрастать.

Полученные результаты были использованы при разработке и внедрении ряда способов изготовления прочных в исходном состоянии и при восстановлении офлюсованных окатышей КачГОКа и ССГОКа. В частности, было установлено, что частично окисленные окатыши, имеющие зональное строение и охлажденные на воздухе, обладают невысокими прочностными свойствами, что связано с наличием в них трещин на границе магнетитового ядра и гематитовой оболочки.

Однако, при охлаждении этих обожженных окатышей в нейтральной среде наблюдались только небольшие нитевидные трещины, не нарушающие сплошности структуры. При этом прочность офлюсованных окатышей КачГОКа увеличивалась в 4–5 раз (с 500–600 до 2000–3000 Н/окатыш), а окатышей ССГОКа – в 3–4 раза (с 1000–1100 до 3000–4400 Н/окатыш) по сравнению с охлаждением их на воздухе [15].

Выводы. Рассмотрена методика, позволяющая проводить расчеты напряженного состояния в окатышах с разным расположением и соотношением магнетитовых и гематитовых зон и тем самым прогнозировать изменение прочности окатышей и разрабатывать рекомендации по их получению с магнетито-гематитовой основой и имеющих необходимую прочность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горбачев В.А., Абзалов В.М., Юрьев Б.П. Кристаллохимическое превращение магнетита в гематит в железорудных окатышах // Изв. вуз. Черная металлургия. 2007. № 4. С. 27–30.
2. Плотников С.В., Бормотов А.С. Механизм фазовых превращений при окислительном обжиге промышленных окатышей из концентратов руд железистых кварцитов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 3. С. 29–32.
3. Yur'ev V.P., Spirin N.A. Oxidation of iron – ore pellets // Steel in Translation. 2011. Vol. 41, No. 5, pp. 400–403.
4. Малышева Т.Я., Юсфин Ю.С., Плотников С.В. Технологические аспекты производства окатышей из магнетитовых руд // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 9. С. 3–5.
5. Кокорин Л.К., Лелеко С.Н. Производство окисленных окатышей. – Екатеринбург: Уральский центр ПФ и рекламы «Марат», 2004. – 280 с.
6. Егоров–Тисменко Ю.К. Кристаллография и кристаллохимия. – М.: Изд-во Книжный дом «Университет», 2010. – 588 с.
7. Булах А.Г., Золотарев А.А., Кривовичев В.Г. Общая минералогия. – М.: Академия, 2008. – 360 с.
8. Горчаков Г.И., Лифанов И.И., Терехин Л.Н. Коэффициенты термического расширения и температурные деформации строительных материалов. – М.: Изд-во стандартов, 1968. – 167 с.
9. Сидоров В.Н. Сопrotивление материалов. – М.: Изд-во Архитектура-С, 2013. – 304 с.
10. Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Тарлаковский Д.В. Теория упругости и пластичности. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 416 с.
11. Илюшин А.А. Пластичность. Упругопластические деформации. – М.: Логос, 2004. – 388 с.
12. Тайра С., Отани Р. Теория высокотемпературной прочности материалов. – М.: Металлургия, 1986. – 280 с.
13. Радченко В.П., Еремин Ю.А. Реологическое деформирование и разрушение материалов и элементов конструкций. – М.: Машиностроение – 1, 2004. – 265 с.
14. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. – М.: Профессия, 2007. – 560 с.
15. Меламуд С.Г., Юрьев Б.П. Изменение прочности железорудных окатышей в процессе термической обработки и способы ее повышения // Сталь. 2014. № 3. С. 6–11.

Поступила 2 сентября 2014 г.

CALCULATION METHODS OF TENSIONS IN BURNT IRON-ORE PELLETS AT THEIR COOLING

S.G. Melamud, *Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director of Training and Design Center «URFU Design Institute»*

(e1944@yandex.ru)

B.P. Yur'ev, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy"*

(yurev-b@mail.ru)

Ural Federal University named after the first President of Russia
B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

Abstract. The paper presents the calculation methods of burnt zonal fluxed pellets at the basis of rising strained state at their cooling on the border of zones with different temperature of crystallization of slag content. The calculations of strained state for Kachkanar pellets with different disposition of hematite and magnetite zones were carried out. It was shown that cooling of the burnt zonal pellets in the air at the border of magnetite core and hematite shell—stretching radial tenses appear and they contribute to the loss of contact between the core and the shell. It was determined that the presence of the three-zonal structure of pellets (core–hematite shell–magnetite film surface) contributes to re-distribution of normal tenses at their section. The increase of thickness of magnetite film surface decreases stretching tenses in radial direction at the border of the core and the shell, in the result of which the strength of pellets rises. At cooling of burnt pellets with hematite core and magnetite shell in the neutral atmosphere at the border of zones stretching normal tenses appear in tangential direction, they contribute to the reduction of strength of pellets.

Keywords: methods, zonal pellets, tension, strength, cooling, atmosphere, magnetite and hematite zones, structure, operational parameters.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-865-870

REFERENCES

- Gorbachev V.A., Abzalov V.M., Yur'ev B.P. Crystal-chemical transformation of magnetite into hematite in iron-ore pellets. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2007, no. 4, pp. 27–30. (In Russ.).
- Plotnikov S.V., Bormotov A.S. Phase transformation mechanism at oxidation burning of industrial pellets, produced from iron quartzite ores. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 3, pp. 29–32. (In Russ.).
- Yur'ev B.P., Spirin N.A. Oxidation of iron-ore pellets. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 5, pp. 400–403.
- Malysheva T.Ya., Yusfin Yu.S., Plotnikov S.V. Technological aspects of production of pellets from magnetite ore. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 9, pp. 3–5. (In Russ.).
- Kokorin L.K., Leleko S.N. *Proizvodstvo oksislennykh okatyshei* [Production of oxidized pellets]. Ekaterinburg: Ural'skii tsentr PF i reklamy "Marat", 2004. 280 p. (In Russ.).
- Egorov–Tismenko Yu.K. *Kristallografiya i kristallokhimiya* [Crystallography and crystal chemistry]. Moscow: Izd-vo Knizhnyi dom "Universitet", 2010. 588 p. (In Russ.).
- Bulakh A.G., Zolotarev A.A., Krivovichev V.G. *Obshchaya mineralogiya* [General mineralogy]. Moscow: Akademiya, 2008. 360 p. (In Russ.).
- Gorchakov G.I., Lifanov I.I., Terekhin L.N. *Koeffitsienty termicheskogo rasshireniya i temperaturnye deformatsii stroitel'nykh materialov* [Coefficients of thermal expansion and temperature deformation of building materials]. Moscow: Izd-vo standartov, 1968. 167 p. (In Russ.).
- Sidorov V.N. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow: Izd-vo Arkhitektura-S, 2013. 304 p. (In Russ.).
- Gorshkov A.G., Starovoitov E.I., Tarlakovskii D.V. *Teoriya uprugosti i plastichnosti* [Theory of elasticity and plasticity]. Moscow: FIZMATLIT, 2002. 416 p. (In Russ.).
- Ilyushin A.A. *Plastichnost'. Uprugoplasticheskie deformatsii* [Plasticity. Elastoplastic deformations]. Moscow: Logos, 2004. 388 p. (In Russ.).
- Taira S., Otani R. *Teoriya vysokotemperaturnoi prochnosti materialov* [Theory of high-temperature material strength] Trans. from Jap. Moscow: Metallurgiya, 1986. 280 p. (In Russ.).
- Radchenko V.P., Eremin Yu.A. *Reologicheskoe deformirovanie i razrushenie materialov i elementov konstruksii* [Rheological deformation and destruction of materials and construction elements]. Moscow: Mashinostroenie–1, 2004. 265 p. (In Russ.).
- Malkin A.Ya., Isaev A.I. *Reologiya: kontseptsii, metody, prilozheniya* [Rheology: conceptions, methods, applications]. Moscow: Professiya, 2007. 560 p. (In Russ.).
- Melamud S.G., Yur'ev B.P. Strength change of iron-ore pellets in the process of thermal treatment and the ways of its increase. *Stal'*. 2014, no. 3, pp. 6–11. (In Russ.).

Received September 2, 2014

УДК 669.168

МОДИФИЦИРОВАНИЕ СТАЛИ БАРИЕМ И СТРОНЦИЕМ**Рожихина И.Д.¹, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов**Нохрина О.И.¹, д.т.н., профессор кафедры металлургии**черных металлов (kafamsf@sibsiu.ru)**Дмитриенко В.И.¹, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов**Платонов М.А.², к.т.н., старший преподаватель кафедры металлургии черных металлов*¹ Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Юргинский технологический институт-филиал Томского политехнического университета

(652000, Россия, Кемеровская обл., г. Юрга, ул. Ленинградская, 26)

Аннотация. Рассмотрен процесс модифицирования стали природными материалами, содержащими барий и стронций. С применением методов термодинамического моделирования рассмотрен процесс восстановления бария и стронция кремнием и алюминием. Изучено влияние процесса обработки стали барийстронциевым модификатором на формирование структуры и механические свойства стали. Результаты исследований реализованы при выплавке стали марок 25Г2С и Г13 в дуговой электропечи литейного цеха ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», а также ОАО «Юргинский машиностроительный завод» при выплавке сталей марок 35ХГСЛ, 30ХГСЛФЛ, 12НД2ФХ с применением двухшлаковой технологии. Анализ результатов промышленных испытаний показал, что барийстронциевый модификатор воздействует на микроструктуру и неметаллические включения, обеспечивает повышение запаса конструктивной прочности сталей, оцениваемой значениями пределов текучести, прочности и ударной вязкости при положительных и отрицательных температурах. Для выявления присутствия в стали бария и стронция был выполнен анализ структуры стали методом экстрактных реплик с использованием просвечивающей электронной дифракционной микроскопии. Наличие бария и стронция в объеме зерна свидетельствует о взаимодействии этих элементов с металлическим расплавом с определенным влиянием на структурообразование металлической матрицы.

Ключевые слова: барий, стронций, процесс модифицирования, термодинамическое моделирование.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-871-876

Одним из основных условий развития технологий производства стали является использование относительно недорогих материалов в виде различных комплексных сплавов и смесей, позволяющих целенаправленно управлять физико-химическим состоянием металлического расплава и, соответственно, получать металлопродукцию с улучшенными эксплуатационными характеристиками. При этом качественные характеристики материалов, используемых при рафинировании и модифицировании, в полной мере должны обеспечивать стабильность, эффективность, экономичность и экологическую безопасность технологий [1, 2].

Получение барий- и стронцийсодержащих лигатур является энерго-, трудо- и материалоемким производством в черной металлургии. При этом операции выплавки, разлива, грануляции, дробления, упаковки лигатур не только требуют больших затрат труда, но и сопровождаются потерями металла. Такие производства являются экологически вредными, пожаро- и взрывоопасными [3 – 7]. В связи с этим весьма перспективной является задача создания технологий, которые позво-

ляли бы проводить модифицирование стали барием и стронцием из природных материалов, минуя стадии производства лигатур [8, 9]. В природных материалах барий и стронций находятся главным образом в виде соединений $BaSO_4$, $SrSO_4$, $BaCO_3$, $SrCO_3$.

В России, на северо-востоке Иркутской области, открыто и разрабатывается уникальное месторождение комплексных карбонатных руд, содержащих кальций, барий и стронций. Руды имеют следующий минеральный состав: 70 – 80 % Sr-Ca-Ba-карбоната, 10 % калиевого полевого шпата, 10 – 20 % пироксена.

Предприятием ООО «НПК Металлтехнопром» освоен выпуск барийстронциевого модификатора БСК-2 по ТУ 1717-001-75073896 – 2005. Модификатор предназначен для производства стали, чугуна и цветных сплавов, а также для покрытий сварочных электродов [10, 11]. По результатам химического анализа барийстронциевый модификатор содержит 13,0 – 19,0 % BaO, 3,5 – 7,5 % SrO, 17,5 – 25,5 % CaO, 19,8 – 29,8 % SiO₂, 0,7 – 1,1 % MgO, 2,5 – 3,5 % K₂O, 1,0 – 2,0 % Na₂O, 1,5 – 6,5 % Fe₂O₃, 0 – 0,4 % MnO, 1,9 – 3,9 % Al₂O₃, 0,7 – 1,1 % TiO₂, 16,0 – 20,0 % CO₂.

Проведенный рентгенофазовый анализ показал, что основными соединениями, входящими в состав барийстронциевого модификатора, являются баритокаль-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности.

цит $BaCa(CO_3)_2$, кальцит $CaCO_3$, кальциостронцианит $CaSr(CO_3)_2$, доломит $MgCO_3$ и сидерит $FeCO_3$.

С целью изучения фазовых и структурных превращений, происходящих в рудных минеральных составляющих барийстронциевого модификатора при нагревании, использовали дифференциально-термический анализ. Из результатов этого анализа следует, что до температуры 1223 К происходит диссоциация доломита, кальцита, баритокальцита и кальциостронцианита. Это означает, что при температурах сталеплавильных процессов (1873 – 1923 К) представляет интерес изучение поведения именно оксидных соединений бария и стронция.

Обычно модифицирование проводится на конечной стадии производства: либо на выпуске из печи в ковш, либо при внепечной обработке стали в ковше, либо непосредственно при разливке. На разных этапах внепечной обработки в качестве восстановителей могут рассматриваться углерод, кремний, алюминий. Для определения условий восстановления бария и стронция из оксидов использовались методы термодинамического моделирования, реализованные в программном комплексе «Терра» [12]. Анализ результатов теоретических расчетов показал, что углерод при температурах 1873 – 1923 К практически не восстанавливает барий и стронций из их оксидов; кремний может восстанавливать барий примерно на 60 %, но плохо восстанавливает стронций (всего лишь на 15 %), а при использовании алюминия степень восстановления бария и стронция из оксидов достигает соответственно 70 и 50 %; температура в интервале 1873 – 2073 К оказывает незначительное влияние на степень восстановления этих элементов (рис. 1).

Из анализа результатов термодинамического моделирования, представленных авторами [13, 14], следует,

что восстановление бария и стронция из их оксидов более полно происходит при использовании в качестве восстановителя алюминия. Для эффективного его использования необходимо предварительное тщательное раскисление металла и шлака с целью снижения окислительного потенциала системы металл–шлак.

Результаты термодинамического моделирования были реализованы при выплавке стали марок 25Г2С и Г13 в дуговых электропечах литейного цеха ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК». Плавки проводили по двухшлаковой технологии. В качестве барийстронцийсодержащего материала использовали модификатор БСК-2, который присаживали в конце восстановительного периода совместно с раскислительной смесью (порошок ферросилиция и коксик). Часть модификатора (25 % от общего количества) вносили в ковш во время выпуска. Шлак перед выпуском дополнительно раскисляли гранулированным алюминием, а металл в ковше раскисляли чушковым алюминием (примерно 1 кг/т) [15].

Металл разливали в слитки массой 7,5 т, прокатывали на квадрат 100 с последующим перекатом на арматуру № 14.

Механические свойства стали контролировали по стандартным методикам в лаборатории механических испытаний ЦЗЛ ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК». Для стали 25Г2С проводили дополнительные испытания на ударную вязкость при температурах 20; 0; –20; –40; –60; –70 °С. Для сравнения таким же испытаниям подвергли четыре плавки стали 25Г2С, выплавленные в 25-т дуговой печи без обработки модификатором БСК-2. Для стали марки Г13 испытания на ударную вязкость проводили при температуре +20 и –60 °С.

После обработки стали марки 25Г2С модификатором БСК-2 улучшились показатели прочности и пластичности и особенно ударной вязкости (табл. 1).

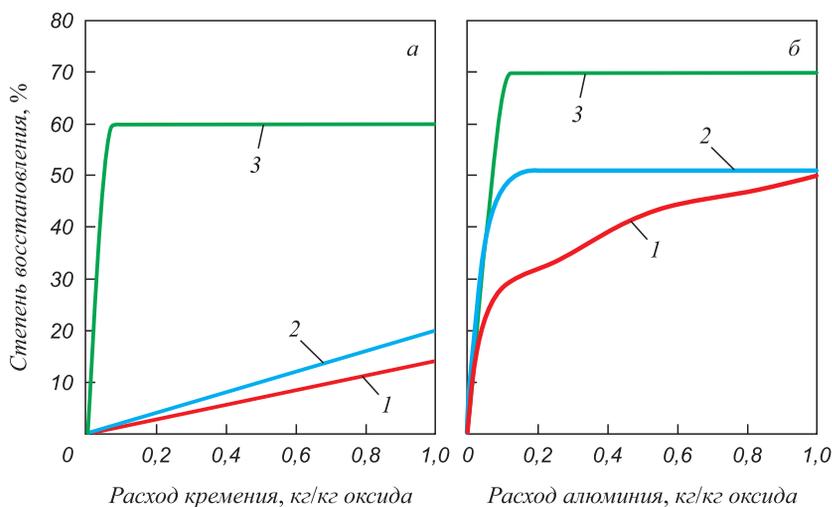


Рис. 1. Изменение степени восстановления стронция при температурах 1873 (1) и 2073 К (2) и бария при температурах 1873 – 2073 К (3) из их оксидов от расхода кремния (а) и алюминия (б)

Fig. 1. Change of strontium reduction degree at the temperatures of 1873 (1) and 2073 K (2), as well as barium at the temperature of 1873 – 2073 K (3) from their oxides on the consumption of silicon (a) and aluminum (b)

Данные по обработке стали марки 25Г2С карбонатитом

Table 1. Data of 25G2S steel treatment with carbonatite

Номер плавки	Расход карбонатита, кг/т	КСУ, кгс·м/см ² , при температуре, °С						I·10 ⁻³	Г _{окс.} , %	Г _{окс.сул.} , %
		+20	0	-20	-40	-60	-70			
Ср.пл. (уср.)	0	10,83	9,38	7,54	7,12	4,21	3,39	77,96	14	13
760050	4,0	11,51	10,44	10,63	8,63	9,18	7,19	27,03	19	36
760260	4,3	12,80	11,20	8,63	10,43	8,33	5,10	30,8	19	75
760264	4,7	11,20	9,93	6,33	6,63	5,67	4,52	-	-	-
760267	7,7	16,3	13,6	12,63	12,17	10,8	10,20	41,02	68	59

Примечание. Г_{окс} и Г_{окс.сул} – глобуляризация оксидов и оксисульфидов

Анализ полученных данных показал, что обработка стали 25Г2С модификатором БСК-2 в количестве 4 кг/т приводит к улучшению ударной вязкости в интервале температур испытаний от +20 до -60 °С. Увеличение расхода модификатора БСК-2 с 4,0 – 4,7 до 7,7 кг/т приводит к дополнительному возрастанию ударной вязкости (в 2,57 – 3,02 раза) в области исследованных температур испытаний от -60 до -70 °С.

Как следует из данных металлографического анализа, обработка стали модификатором БСК-2 (рис. 2) снижает индекс I, характеризующий загрязненность стали неметаллическими включениями, и обеспечивает высокий уровень их глобуляризации (Г). При этом фиксировалось измельчение ферритоперлитной структуры стали за счет устранения грубых участков кремний-марганцовистых ликвационных образований.

Несколько серий плавков по модифицированию стали барийстронциевым модификатором были также про-

ведены в дуговых сталеплавильных печах цеха № 10 ООО «Юргинский машзавод» при выплавке стали марок 35ХГСЛ, 30ХГСФЛ, 12НД2ФХ с применением двушлаковой технологии.

После выпуска плавки во время разливки отбирали ковшовую пробу металла для проведения анализа химического состава и заливали пробные бруски для проведения механических испытаний.

Определение концентрации химических элементов, оценку неметаллических включений в литых пробах и механические испытания изготовленных образцов проводили в лабораториях ООО «Юргинский машзавод». Усредненные результаты проведенных механических испытаний стали 35ХГСЛ показали повышение запаса конструкционной прочности стали на 20 – 50 % после обработки барийстронциевым модификатором, характеризующейся значениями пределов текучести, прочности и ударной вязкости при положительных и отрицательных температурах (рис. 3). В технологическом плане производство сталей с указанными свойствами не вызывает затруднений.

Для изучения процесса взаимодействия шлаковых расплавов, содержащих соединения бария и стронция, с металлическим расплавом были проведены лабораторные исследования.

Подготовленные образцы были исследованы с применением металлографического анализа, результаты которого показали, что обработка металла соединениями бария и стронция не оказывает значительного влияния на формирование неметаллических включений, но в то же время влияет на структурообразование.

Образец, при выплавке которого в состав шлакообразующей смеси не вводили соединения бария и стронция, имел видманштеттову структуру, характерную для сталей с низкими механическими свойствами, а образцы, обработанные шлакообразующими смесями, содержащими барий и стронций, имели структуру, представляющую собой пластинчатый перлит с выделениями феррита по границам зерен, и отдельными выделениями феррита внутри перлитных зерен, харак-

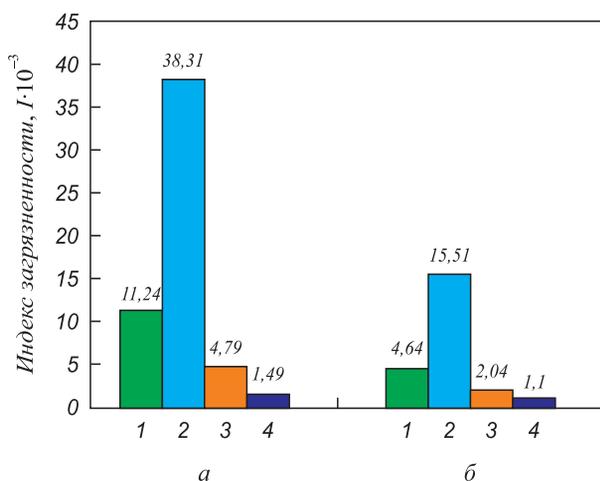


Рис. 2. Загрязненность стали 25Г2С (по результатам 5 плавков): а – без обработки модификатором; б – с обработкой модификатором; 1 – оксиды; 2 – оксисульфиды; 3 – сульфиды; 4 – силикаты

Fig. 2. 25G2S steel impurity (according to the results of 5 meltings): а – without treatment with modifier; б – with treatment with modifier; 1 – oxides; 2 – oxysulfides; 3 – sulphides; 4 – silicates

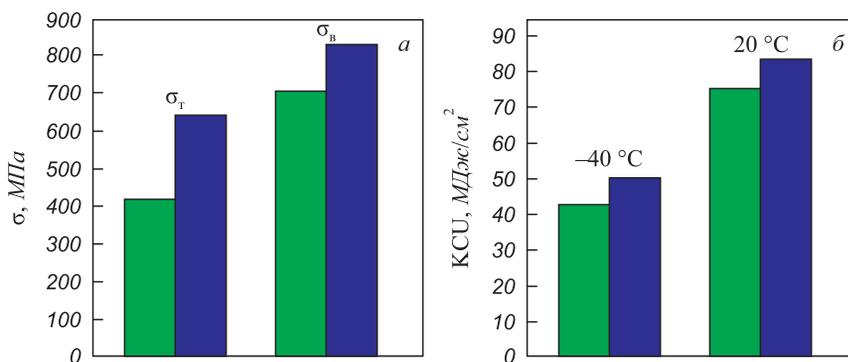


Рис. 3. Механические свойства (а) и ударная вязкость (б) стали 35ХГСЛ после нормализации (1143 – 1173 К) и отпуска (873 – 923 К): ■ – без обработки; ■ – с обработкой барийстронциевым модификатором

Fig. 3. Mechanical properties (a) and impact strength (б) of 35KhGSL steel after normalization (1143 – 1173 K) and tempering (873 – 923 K) : ■ – no treatment; ■ – treatment with barium strontium modifier

терную для сталей с более высокими механическими свойствами.

Результаты анализа химического состава не показали наличия в образцах бария и стронция, предположительно, из-за низкого их содержания. Для выявления присутствия в стали этих элементов образцы исследовали методом сканирующей электронной микроскопии. Результаты исследований представлены в табл. 2, из данных которой следует, что барий и стронций дифференцированно располагаются по структурным составляющим металлической матрицы. Более предпочтительными местами расположения бария и стронция является объем зерен перлита и феррита.

С целью обнаружения места локализации бария и стронция в стали (твердый раствор или включения вторых фаз) был выполнен анализ ее структуры методом экстрактивных реплик с использованием просвечивающей электронной дифракционной микроскопии. Из анализа полученных результатов следует, что частицы, экстрагированные на реплику, имеют малые размеры (в пределах 50 – 500 нм), при этом анализ микроэлектроннограммы показывает, что наряду с оксидами и карбидами железа в исследуемых образцах присутст-

вуют соединения бария и стронция: C_2BaO_4 , $SrFeO_{2,97}$, $Ba_2Fe_6O_{11}$, $BaSrFe_4O_8$, $Ba_3Fe_2O_6$, $Ba_2Fe_{14}O_{22}$ (рис. 4).

Проведенные исследования подтвердили, что барий и стронций активно участвуют в образовании структурных составляющих в момент кристаллизации. Наличие бария и стронция в объеме зерна свидетельствует о взаимодействии этих элементов с металлическим расплавом с определенным влиянием на структурообразование металлической матрицы. Наличие сложных соединений, в состав которых входят барий и стронций, указывает на взаимодействие элементов с неметаллическими включениями. Выявленные размеры соединений подтверждают мнение о том, что взаимодействие соединений бария и стронция происходит на наноуровне.

Выводы. На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований можно предложить такую последовательность процессов при модифицировании стали барийстронциевым модификатором: разложение карбонатов кальция, бария и стронция; расплавление барийстронциевого модификатора и восстановление бария из оксида кремнием при раскислении шлака; восстановление кальция, бария и стронция из оксидов и карбонатов введенным алюминием; довосстановление бария, стронция из оксидов алюминием и кремнием, растворенными в стали.

Таблица 2

Относительные средние значения результатов элементного анализа поверхности образцов

Table 2. Relative average value of the element analysis results of the sample surface

Содержание, %, бария/стронция		
в зерне феррита	в зерне перлита	на границе раздела
Образец № 4		
0,20/0,70	0,05/0,85	0/0,08
Образец № 5		
0,05/0,30	0,05/0,09	0,05/0

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ферросплавы с редкоземельными и щелочноземельными металлами / И.В. Рябчиков, В.Г. Мизин, Н.П. Лякишев, А.С. Дубровин. – М.: Металлургия, 1983. – 272 с.
2. Кожевников Т.Н., Зайко В.П., Рысс М.А. Электротермия лигатур щелочноземельных металлов с кремнием. – М.: Наука, 1978. – 224 с.
3. Григорьев Ю.В., Рябчиков И.В., Рошин В.Е. Термодинамический анализ совместного восстановления кремния и бария углеродом // Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 7. С. 3 – 5.
4. Парфенов А.А., Кашаев Ю.Я., Скуратович А.И. и др Производство ферросилиция с барием – нового высокоэффективного модификатора. – В кн.: Повышение эффективности и качества ферросплавов: Науч. тр. НИИМ. – М.: Металлургия, 1986. С. 13 – 18.

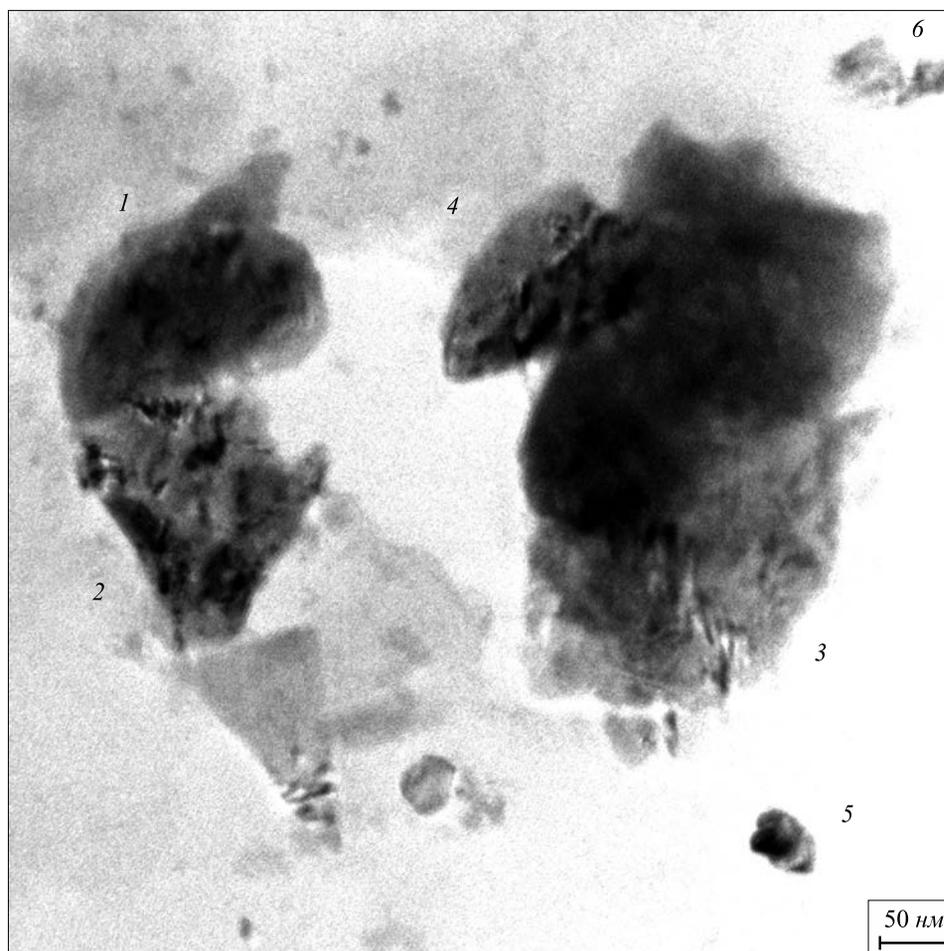


Рис. 4. Фрагмент электронно-микроскопического анализа методом электронных реплик:
1, 2 – SrCO_3 ; 3 – Fe_3O_4 ; 4 – $\text{BaSrFe}_4\text{O}_8$; 5 – $\text{Ba}_3\text{Fe}_2\text{O}_6$; 6 – $\text{Ba}_2\text{Fe}_{14}\text{O}_{22}$

Fig. 4. Fragment of submicroscopic analysis by the method of electronic uniformity trial:
1, 2 – SrCO_3 ; 3 – Fe_3O_4 ; 4 – $\text{BaSrFe}_4\text{O}_8$; 5 – $\text{Ba}_3\text{Fe}_2\text{O}_6$; 6 – $\text{Ba}_2\text{Fe}_{14}\text{O}_{22}$

5. Григорьев Ю.В., Рябчиков И.В., Рошин В.Е. Исследование углеродотермической технологии выплавки силикобария из кусковой шихты. – В кн.: Современные проблемы электрометаллургии стали: Материалы XII Международной конф. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. С. 204 – 208.
6. Парфенов А.А., Исхаков Ф.М., Рысс М.А. и др. Технология выплавки 90 %-ного ферросилиция с барием // Черная металлургия. Бюл. НТИ. 1987. № 12 (1040). С. 35, 36.
7. Быстрова И.С., Баев А.И. Особенности силикотермического восстановления бария из его сульфата. – В кн.: Совершенствование технологии ферросплавов: Сб. науч. тр. НИИМ. – М.: Металлургия, 1981. С. 25 – 30.
8. Дерябин А.А., Павлов В.В., Могильный В.В. и др. Эффективность нанотехнологий модифицирования рельсовой стали барием // Сталь. 2007. № 11. С. 134 – 141.
9. Дерябин А.А., Берестов Е.Ю. О механизме модифицирования стали щелочноземельными металлами // Электрометаллургия. 2008. № 6. С. 35 – 38.
10. Черняк С.С., Ромен Б.М. Высокомарганцовистая сталь в драгостроении. – Иркутск: Изд-во Иркутского университета, 1996. – 377 с.
11. Ивакин В.Л., Черняк С.С., Пимнев Д.Ю. Новая технология повышения качества металлов и сплавов барийстронциевым карбонатом. – Иркутск: Изд-во Иркутского госуниверситета, 2004. – 123 с.
12. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. – М.: Металлургия, 1994. – 352 с.
13. Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Платонов М.А., Дмитриенко В.И. Восстановление бария и стронция в процессе обработки стали // Черные металлы: Руда и металлы. 2011. № 4. С. 29 – 31.
14. Нохрина О.И., Дмитриенко В.И., Рожихина И.Д., Платонов М.А. Использование карбоната для микролегирования стали // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 6. С. 38 – 40.
15. Дмитриенко В.И., Рожихина И.Д., Нохрина О.И., Айзатулов Р.С., Платонов М.А. Исследование восстановления бария и стронция применительно к условиям внепечной обработки стали // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 4. С. 27 – 29.

Поступила 23 июня 2014 г.

MODIFICATION OF STEEL BY BARIUM AND STRONTIUM

I.D. Rozhikhina¹, *Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy*

O.I. Nokhrina¹, *Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy* (kafamf@sibsiu.ru)

V.I. Dmitrienko¹, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy*

M.A. Platonov², *Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Ferrous Metallurgy*

¹**Siberian State Industrial University** (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

²**Yurga Technological Institute of National Research Tomsk Polytechnic University** (26, Lelingradskaya str., Yurga, Kemerovo Region, 652000, Russia)

Abstract. The article is devoted to the steel modification process with natural materials containing barium and strontium. Using the methods of thermodynamic simulation, the authors considered the reduction process of barium and strontium with silicon and aluminum. The influence of steel treatment with barium-strontium modifiers on the structure formation and mechanical properties of steel has been studied. The research results have been implemented when smelting of steel of 25G2S and G13 grades in electric arc furnace at casting shop of OJSC “EVRAZ ZSMK”, as well as at OJSC “Yurginskii Machine-Engineering Plant” when smelting of steel of 35CrGSL, 30CrGSLFL, 12ND2FCr grades using the two-slag technology. The results analysis of the production experiments has shown that a barium-strontium modifier influences the microstructure and non-metallic inclusions, as well as provides the supply increase of structural strength of steel estimated by the values of yield point, strength and impact strength at the positive and negative temperatures. To reveal the presence of barium and strontium in steel the analysis of steel structure has been done, when using the extraction replica method with the usage of transmission electron diffraction microscopy. The presence of barium and strontium in the grain capacity indicates the interaction of these elements with metallic melt having a certain influence on the structure formation of a metallic matrix.

Keywords: barium, strontium, modification process, thermodynamic simulation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-871-876

REFERENCES

- Ryabchikov I.V., Mizin V.G., Lyakishev N.P., Dubrovin A.S. *Ferrosplavy s redkozemel'nymi i shchelochnozemel'nymi metallami* [Ferroalloys with rare-earth and alkaline-earth metals]. Moscow: Metallurgiya, 1983. 272 p. (In Russ.).
- Kozhevnikov T.N., Zaiko V.P., Ryss M.A. *Elektrotermiya ligatur shchelochnozemel'nykh metallov s kremniem* [Electrothermics of additional alloys of alkaline-earth metals with silicon]. Moscow: Nauka, 1978. 224 p. (In Russ.).
- Grigor'ev Yu.V., Ryabchikov I.V., Roshchin V.E. Thermodynamic analysis of co-reduction of silicon and barium with carbon. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2005, no. 7, pp. 3–5. (In Russ.).
- Parfenov A.A., Kashaev Yu.Ya., Skuratovich A.I. etc. Ferrosilicon production with barium – new high-performance modifier. In: *Povyshenie effektivnosti i kachestva ferrosplavov: Nauch. tr. NIIM* [Efficiency increase and ferroalloy quality: Scientific work of Research Institute of Metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1986. pp. 13–18. (In Russ.).
- Grigor'ev Yu.V., Ryabchikov I.V., Roshchin V.E. Research of carbon-thermal smelting technology of silicon-barium from cobbled charge. In: *Sovremennyye problemy elektrometallurgii stali: Materialy XII Mezhduнародnoi konf.* [Modern problems of steel electro-metallurgy: Materials of XII International Conference]. Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGU, 2004, pp. 204–208. (In Russ.).
- Parfenov A.A., Iskhakov F.M., Ryss M.A. etc. Smelting process of 90 %-ferrosilicon with barium. *Chernaya metallurgiya. Byul. NTI*. 1987, no. 12 (1040), pp. 35–36. (In Russ.).
- Bystrova I.S., Baev A.I. Peculiarities of silicothermal reduction of barium from its sulphate. In: *Sovershenstvovanie tekhnologii ferrosplavov: sb. nauch. tr. NIIM* [Modern technologies of ferroalloys: collected scientific papers of Research Institute of Metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1981, pp. 25–30. (In Russ.).
- Deryabin A.A., Pavlov V.V., Mogil'nyi V.V., Godik L.A., Tsepelev V.S., Konashkov V.V., Gorkavenko V.V., Berestov E.Yu. Nanomodification of rail steel with barium. *Steel in translation*. 2007, vol. 37, no. 11, pp. 966–973.
- Deryabin A.A., Berestov E.Yu. On the steel modification mechanism with alkaline-earth metals. *Elektrometallurgiya*. 2008, no. 6, pp. 35–38. (In Russ.).
- Chernyak S.S., Romen B.M. *Vysokomargantsovistaya stal' v gradostroenii* [High-manganese steel in urban development]. Irkutsk: Izd-vo Irkutskogo universiteta, 1996. 377 p. (In Russ.).
- Ivakin V.L., Chernyak S.S., Pimnev D.Yu. *Novaya tekhnologiya povysheniya kachestva metallov i splavov bariistrontsiyevym karbonatom* [New technology of quality increase of metals and alloys by barium-strontium carbonate]. Irkutsk, 2004. 123 p. (In Russ.).
- Vatolin N.A., Moiseev G.K., Trusov B.G. *Termodinamicheskoe modelirovanie v vysokotemperaturnykh neorganicheskikh sistemakh* [Thermodynamic modeling in high-temperature inorganic systems]. M.: Metallurgiya, 1994. 352 p. (In Russ.).
- Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Platonov M.A., Dmitrienko V.I. Barium and strontium reduction in steel treatment process. *Chernye metally: Ruda i metally*. 2011, no. 4, pp. 29–31. (In Russ.).
- Nokhrina O.I., Dmitrienko V.I., Rozhikhina I.D., Platonov M.A. Carbonatite application for steel microalloying. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 6, pp. 38–40. (In Russ.).
- Dmitrienko V.I., Rozhikhina I.D., Nokhrina O.I., Aizatulov R.S., Platonov M.A. Study of barium and strontium recovery in relation to the conditions of out-of-furnace steel processing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 4, pp. 27–29. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was financially supported by the Ministry of Education and Science as the project part of the state task in the field of scientific research.

Received June 23, 2014

УДК 669.017.3 + 661.865.4 + 544.015.3 + 544.015.4

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЛАНТАНА С КОМПОНЕНТАМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА *

*Михайлов Г.Г.¹, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой физической химии
Макровец Л.А.¹, инженер кафедры физической химии (tchla@mail.ru)
Смирнов Л.А.², академик РАН, д.т.н., главный научный сотрудник*

¹ Южно-Уральский государственный университет
(458080, Россия, Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76)

² Институт металлургии УрО РАН
(620016, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101а)

Аннотация. На основании выполненного термодинамического анализа оксидных двойных и тройных систем, имеющих в качестве компонента оксид La_2O_3 , сформирована база энергетических параметров теории субрегулярных растворов оксидных расплавов, сопряженных с областью существования металлических расплавов. Установлены температурные зависимости констант равновесия для гетерогенных реакций раскисления стали. Построены поверхности растворимости компонентов в кислородсодержащей стали (ПКМ) для систем Fe-Al-La-O-C , Fe-Ca-La-O-C , Fe-Mg-La-O-C , Fe-Si-La-O-C , Fe-Cr-La-O-C . Построены диаграммы комплексного раскисления стали сплавами и смесевыми модификаторами, содержащими активные и легирующие элементы: Ca, Mg, Si, Al, Cr, La. Анализ выполнен для хорошо раскисленного и обессеренного металла. При обычной схеме раскисления, в результате которой РЗМ вводятся после введения в металл кальция, кремния и алюминия, образовавшиеся включения, представляющие собой конгломерат алюминатов кальция и магнезия, служат подложкой для выделения мелких фракций, активно взаимодействуют с жидкой составляющей включений, растворяются в ней и поэтому оксид La_2O_3 в виде самостоятельной фазы в металлических включениях отсутствует.

Ключевые слова: диаграмма состояний, фазовые равновесия, лантан, термодинамика, раскисление.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-877-884

Лантан относится к редкоземельным металлам (РЗМ). Сплавы с различным содержанием редкоземельных элементов все чаще используются на конечной стадии рафинирования стали [1, 2]. РЗМ, вводимые в хорошо раскисленный и обессеренный металл, эффективно измельчают первичную структуру литого металла, снижают концентрацию кислорода, азота, серы и даже цветных металлов в металлической матрице и хорошо очищают межзеренную границу. Неметаллические включения, содержащие оксиды и сульфиды РЗМ, введенных в хорошо раскисленный металл, как правило, имеют размеры порядка несколько микрон. Влияние РЗМ на структуру литого металла приводит к повышению технологической пластичности, ударной вязкости, прочности, коррозионной стойкости [3, 4].

Так как для целей модифицирования стали редкоземельные металлы получают из комплексных руд, то многочисленные предложения рафинирующих сплавов с РЗМ являются комплексными, т.е. содержат La, Ce, Nd, Pr [5, 6]. Дополнительно в состав комплексных сплавов для модифицирования также входят Si, Al, Ca, Ba, Y, Zr.

В литературе приводится значительное количество различных по составам сплавов с РЗМ и ЦЗМ, но

влияние каждого отдельного компонента этих сплавов в силу экспериментальных трудностей пока не установлено. В какой-то степени эту проблему можно решить при проведении термодинамического анализа реакций взаимодействия редкоземельных металлов с кислородом в присутствии других компонентов жидкой стали. При проведении такого анализа прежде всего необходимо установить на диаграммах состояний исследуемых систем строение оксидных фаз, сопряженных с областью существования жидкого металла. При определении активностей оксидных компонентов использовался вариант теории субрегулярных растворов, в котором учитывалась квадратичная зависимость координационного числа катионов от состава [7]. Были проанализированы и построены на основании экспериментальных данных диаграммы состояния $\text{FeO-La}_2\text{O}_3$, $\text{Al}_2\text{O}_3-La_2\text{O}_3$, $\text{CaO-La}_2\text{O}_3$, $\text{MgO-La}_2\text{O}_3$, $\text{Cr}_2\text{O}_3-La_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2-La_2\text{O}_3$. По этим системам в литературе имеются в ряде случаев неоднозначные сведения [8 – 12]. Для более сложных тройных оксидных систем высокотемпературных диаграмм состояний не имеется. С использованием ограниченных сведений по температурам и теплотам плавления определенных оксидов, возможным соединениям удалось впервые построить диаграммы состояния для систем $\text{FeO-Cr}_2\text{O}_3-La_2\text{O}_3$,

* Работа поддержана грантом РФФИ № 13-08-12167.

FeO–Al₂O₃–La₂O₃, FeO–CaO–La₂O₃, FeO–MgO–La₂O₃, FeO–SiO₂–La₂O₃ [13].

При выполнении термодинамических расчетов была сформирована база данных по константам равновесия для реакций раскисления (табл. 1).

Для проведения расчетов раскислительной способности необходимо знать также энергетические параметры теории субрегулярных растворов. Значения параметров подобраны при моделировании оксидных систем, сопряженных с жидким металлом, и приведены в табл. 2. Параметры взаимодействия, необходимые для вычисления коэффициентов активностей компонентов, растворенных в жидкой стали, приведены в табл. 3.

Подробно использование параметров теории и методика проведения расчетов описаны в монографии [7].

Результаты термодинамических расчетов представлены в виде проекции поверхности растворимости компонентов (ПРKM) в жидком металлическом многокомпонентном расплаве, содержащем кислород, на плоскость концентраций.

При построении ПРKM контрастными линиями обозначены составы металла, равновесного с двумя оксидными фазами. На рис. 1 представлена поверхность растворимости лантана и алюминия в кислородсодержащем металле. По сути это диаграмма раскислительной способности алюминия и лантана после их введения в жидкий металлический расплав. На линии *fn* (рис. 1) заданы составы металла, равновесного одновременно с корундом и соединением La₂O₃·Al₂O₃, на линии *fe* – с корундом

Т а б л и ц а 1

Зависимости констант равновесия от температуры [14, 15]

Table 1. Dependence of equilibrium constants on the temperature [14, 15]

Реакция	lg K
(FeO) = [Fe] + [O]	-6320/T + 4,734
(La ₂ O ₃) = 2 [La] + 3 [O]	-58 115/T + 12,57
(MgO) = [Mg] + [O]	-22 457/T + 6,54
(CaO) = [Ca] + [O]	-31 480/T + 12,55
(Al ₂ O ₃) = 2 [Al] + 3 [O]	-58 320/T + 18,02
(Cr ₂ O ₃) = 2 [Cr] + 3 [O]	-33 460/T + 14,85
(CrO) = [Cr] + [O]	-8203/T + 4,51
(SiO ₂) = [Si] + 2 [O]	-30 225/T + 11,56
La ₂ O ₃ = 2 [La] + 3 [O]	-62 050/T + 14,10
FeO = [Fe] + [O]	-8069/T + 5,8
MgO = [Mg] + [O]	-26 500/T + 7,85
CaO = [Ca] + [O]	-34 103/T + 13,46
Al ₂ O ₃ = 2 [Al] + 3 [O]	-64 000/T + 20,48
Cr ₂ O ₃ = 2 [Cr] + 3 [O]	-40 014/T + 17,37
Cr ₃ O ₄ = 3 [Cr] + 4 [O]	-53 352/T + 23,51
SiO ₂ = [Si] + 2 [O]	-31 100/T + 12,0
FeO·Cr ₂ O ₃ = [Fe] + 2 [Cr] + 4 [O]	-51 870/T + 24,48
FeO·Al ₂ O ₃ = [Fe] + 2 [Al] + 4 [O]	-74 580/T + 26,37
La ₂ O ₃ ·Al ₂ O ₃ = 2 [La] + 2 [Al] + 6 [O]	-124 156/T + 32,45
La ₂ O ₃ ·11Al ₂ O ₃ = 2 [La] + 22 [Al] + 36 [O]	-740 206/T + 225,50
La ₂ O ₃ ·Cr ₂ O ₃ = 2 [La] + 2 [Cr] + 6 [O]	-113 793/T + 32,39
La ₂ O ₃ ·SiO ₂ = 2 [La] + [Si] + 5 [O]	-90 955/T + 24,25
La ₂ O ₃ ·2SiO ₂ = 2 [La] + 2 [Si] + 7 [O]	-119 753/T + 34,97
2La ₂ O ₃ ·3SiO ₂ = 4 [La] + 3 [Si] + 12 [O]	-208 857/T + 58,26
{CO} = [C] + [O]	-1168/T - 2,07
{CO ₂ } = [C] + 2[O]	-9616/T + 2,51
{Ca} = [Ca]	-1912/T - 2,69
{Mg} = [Mg]	6670/T - 6,48

и герцинитом и т.д. На полях ПРКМ указаны оксидные фазы, равновесные с жидким металлом. Так, в области I задан состав металла, находящегося в равновесии с оксидным расплавом (О.р.), в области II – с герцинитом, в области III – с корундом, в области IV – с La_2O_3 , в области V – с $\text{La}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$. На рис. 1 представлена также диаграмма состояний системы $\text{FeO}-\text{La}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3$ [7].

Фазы, указанные на оксидной диаграмме при $T > 1550^\circ\text{C}$, могут сосуществовать в равновесии с жидким металлом и определять степень его окисленности.

Из рис. 1 следует, что при тысячных долях массовых процентов лантан единолично определяет степень раскисленности металла. Последняя указывается изокис-

Т а б л и ц а 2

Значения параметров теории субрегулярных ионных растворов для двух- и трехкомпонентных оксидных расплавов

Table 2. Parameters of the theory of subregular ionic solutions for two- and three-component oxide melts

Система	Параметры теории Q_{ijkl} , Дж /моль		
$\text{FeO}-\text{La}_2\text{O}_3$	0	0	0
$\text{FeO}-\text{Cr}_2\text{O}_3$	1042	6382	1283
$\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3$	661	-16 329	-4917
$\text{FeO}-\text{MgO}$	-2500	-5000	-2500
$\text{FeO}-\text{CaO}$	-6897	-13 794	-6897
$\text{FeO}-\text{SiO}_2$	229	-8162	12 088
$\text{Cr}_2\text{O}_3-\text{La}_2\text{O}_3$	-21 983	-7675	-29 717
$\text{Al}_2\text{O}_3-\text{La}_2\text{O}_3$	-16 759	-1924	-16 425
$\text{MgO}-\text{La}_2\text{O}_3$	-6667	749	16 759
$\text{CaO}-\text{La}_2\text{O}_3$	19 825	33 335	16 094
$\text{SiO}_2-\text{La}_2\text{O}_3$	36 952	-22 247	-31 452
$\text{FeO}-\text{Cr}_2\text{O}_3-\text{La}_2\text{O}_3$	-376 425	-167 300	-376 425
$\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{La}_2\text{O}_3$	-41 825	41 825	-125 475
$\text{FeO}-\text{MgO}-\text{La}_2\text{O}_3$	0	0	0
$\text{FeO}-\text{CaO}-\text{La}_2\text{O}_3$	0	0	-30 000
$\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{La}_2\text{O}_3$	-20 912	62 738	-41 825

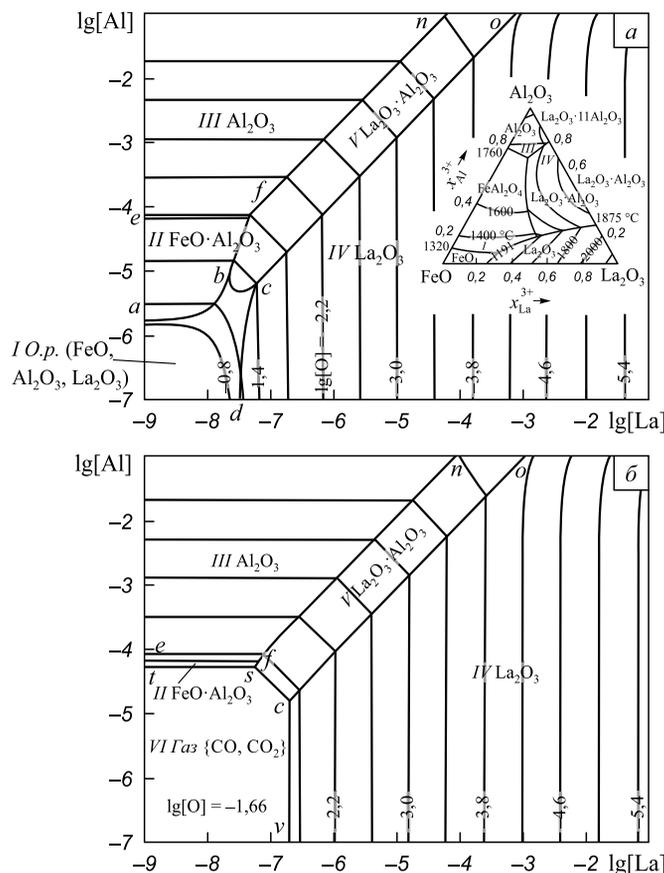


Рис. 1. ПРКМ системы Fe–Al–La–O–C; здесь и на рис. 2–5: $T = 1600^\circ\text{C}$, $P_{\text{общ}} = 1$ атм; а – $[\text{C}] = 0$; б – $[\text{C}] = 0,1\%$ (по массе)

Fig 1. Solubility surfaces in oxygen-containing steel of the system of Fe–Al–La–O–C; here and on Figures 2–5: $T = 1600^\circ\text{C}$, $P_{\text{общ}} = 1$ atm.; а – $[\text{C}] = 0$; б – $[\text{C}] = 0,1\%$ (mass.)

Т а б л и ц а 3

Удельные параметры взаимодействия e_i^j ($T = 1600^\circ\text{C}$) для компонентов металлического расплава [16, 17]

Table 3. Specific interaction parameters e_i^j ($T = 1600^\circ\text{C}$) for the components of the metallic melt [16, 17]

Элемент i	Элемент j							
	La	Si	Ca	Mg	Al	Cr	O	C
La	-0,0078	-0,351	-0,407	-0,42476	-0,0776	0,0216	-5,0134	-1,248
Si	-0,0674	0,14	-0,067	0,00998	0,056	-0,0003	-0,176	0,187
Ca	-0,1144	-0,096	-0,07	-0,1084	-0,0718	0	-3,507	-0,324
Mg	-0,0707	0,0086	-0,064	-0,085	-0,0089	-0,0248	-3,008	0,14
Al	-0,01158	0,058	-0,0515	-0,00998	0,045	0,024	-1,62	0,0966
Cr	0,0108	-0,0006	0	-0,053	0,052	-0,0003	-0,133	-0,104
O	-0,57	-0,1	-1,41	-1,98	-0,96	-0,041	-0,2	-0,45
C	-0,1039	0,08	-0,097	0,07	0,043	-0,024	-0,34	0,14

лородными сечениями ПРКМ, обозначенными тонкими линиями. Так как РЗМ вводятся на финишных этапах раскисления, в металле могут находиться ранее образовавшиеся алюминатные неметаллические включения, но вводимый позже лантан взаимодействует с оставшимися включениями, как бы подчищает металл, и в связи с малым количеством оставшегося кислорода включения после введения РЗМ имеют размеры в основном порядка нескольких микрон [18].

В сталь РЗМ могут вводиться совместно с силико-кальцием [18]. Диаграмма совместного раскисления стали кальцием и лантаном приведена на рис. 2. Из вида ПРКМ системы Fe–Ca–La–O–C следует, что уже тысячных долей процентов лантана достаточно, чтобы ограничить воздействие кальция на металл. Поэтому, как правило, после введения сплавов РЗМ в сталь неметаллические включения, ранее состоящие из алюминатов кальция, становятся округлыми по внешнему виду и комплексными по составу. На рис. 2, б показана область раскислительной способности углерода. Видно, что при тысячных долях процента лантан и кальций в металле блокируют процесс окисления углерода. На линии *ob* (рис. 2, б) заданы составы металла, равновесного с CaO и парами кальция, на линии *nb* – с La₂O₃ и парами кальция.

Аналогичный вид имеет ПРКМ для системы Fe–Mg–La–O–C (рис. 3), только на них заданы составы металла, равновесного с оксидными расплавами (FeO,

MgO, La₂O₃), с твердым оксидом La₂O₃, твердыми растворами FeO–MgO, парами магния и газовой фазой CO–CO₂.

Растворимость компонентов в жидком металле системы Fe–Si–La–O–C представлена на рис. 4. Здесь определены составы металла, находящегося в равновесии с SiO₂, с силикатами лантана La₂O₃·SiO₂, La₂O₃·2SiO₂, с оксидными расплавами (FeO, SiO₂, La₂O₃). Если учесть наличие углерода в металле 0,1 % по массе (рис. 4, б), то проявится область составов металла, равновесного с газовой фазой CO–CO₂. Но проявление равновесия с этой газовой фазой возможно лишь при следах лантана и сотых долях процента кремния в металле.

На рис. 5 представлена ПРКМ системы Fe–Cr–La–O–C. Видно, что образование оксидных расплавов в качестве неметаллических включений невозможно уже при концентрации углерода в металле порядка 0,1 % (по массе). Положение линии *tv* на рис. 5, б говорит о возможности образования соединения La₂O₃·Cr₂O₃ в качестве равновесной с металлом оксидной фазы при обычных для легирования концентрациях хрома и следах лантана в металле. Флуктуация лантана до тысячных долей процента вполне возможна и при введении РЗМ в виде порошковой проволоки.

Выводы. Построены модели диаграммы состояния FeO–La₂O₃–Al₂O₃, FeO–La₂O₃–Cr₂O₃, FeO–La₂O₃–CaO, FeO–La₂O₃–MgO, FeO–La₂O₃–SiO₂. Установлены за-

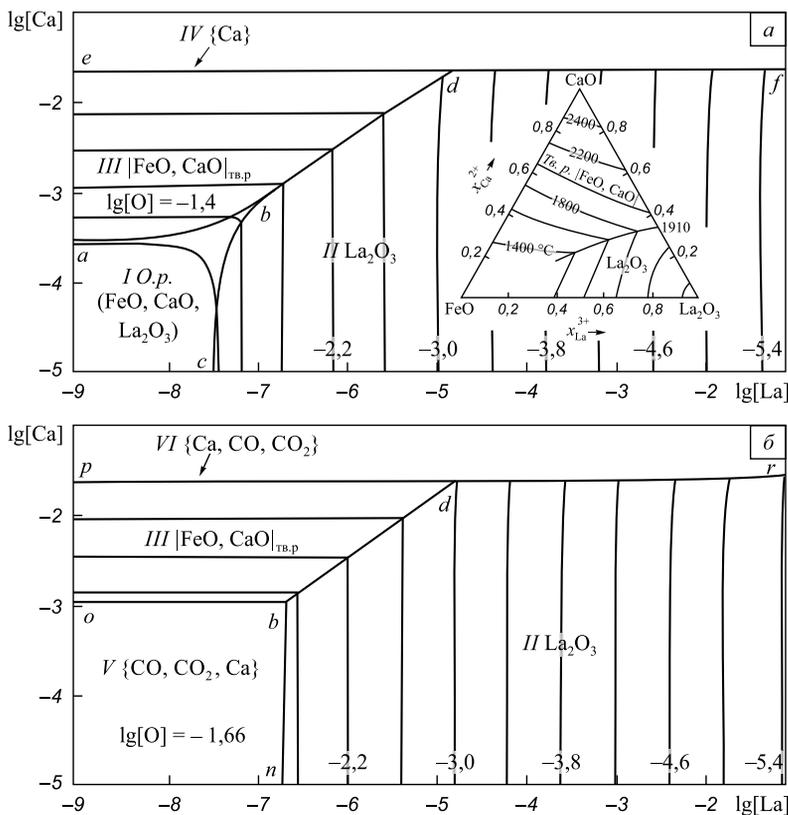


Рис. 2. ПРКМ системы Fe–Ca–La–O–C

Fig. 2. Solubility surfaces in oxygen-containing steel of the system of Fe–Ca–La–O–C

висимости значений констант равновесия от температуры для реакций образования лантансодержащих оксидных фаз из компонентов жидкой стали. Построены поверхности растворимости компонентов в жидкой стали для систем Fe–Al–La–O–C, Fe–Ca–La–O–C, Fe–Mg–La–O–C, Fe–Si–La–O–C, Fe–Cr–La–O–C.

Установлена гетерогенность неметаллических включений, образующихся в результате финишных операций раскисления и легирования стали, разделение их в основном на оксидобразующие многокомпонентные составляющие и промежуточную сложную по составу фазу.

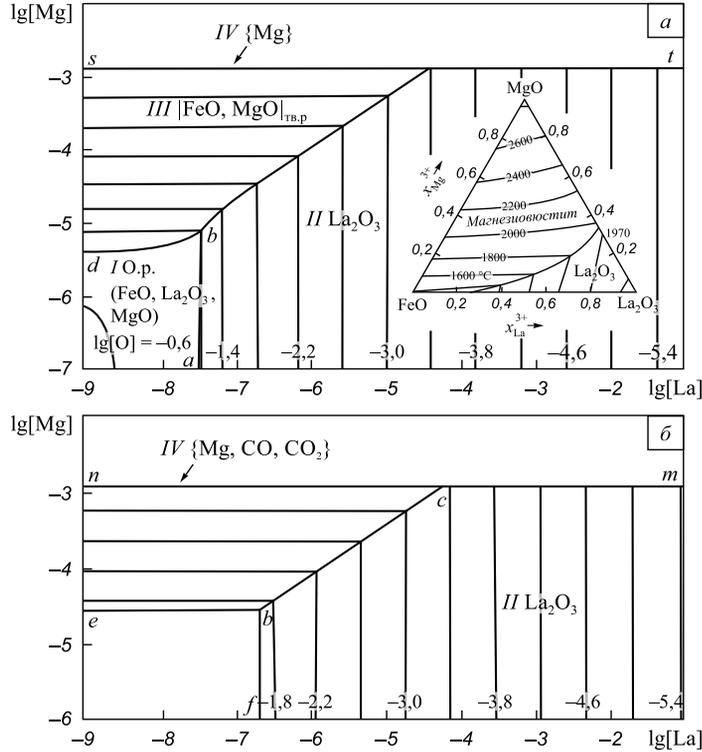


Рис. 3. ПРKM системы Fe–Mg–La–O–C

Fig. 3. Solubility surfaces in oxygen-containing steel of the system of Fe–Mg–La–O–C

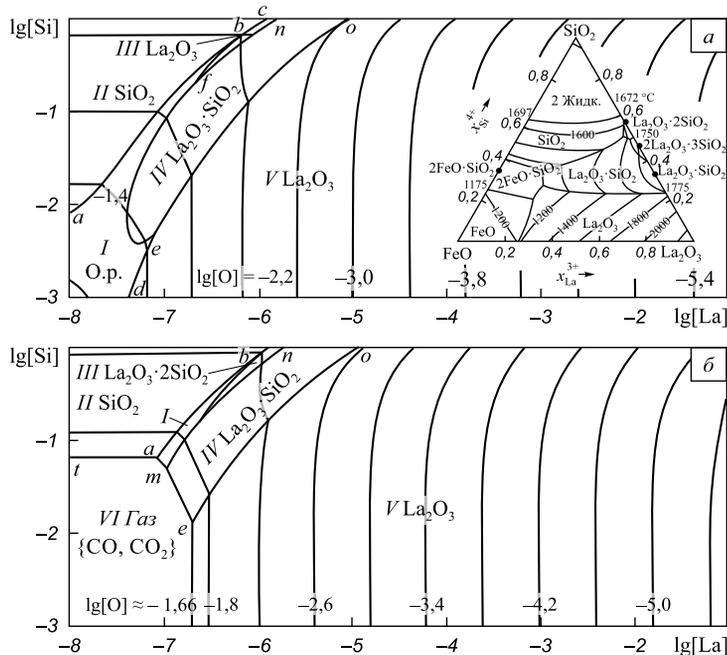


Рис. 4. ПРKM системы Fe–Si–La–O–C

Fig. 4. Solubility surfaces in oxygen-containing steel of the system of Fe–Si–La–O–C

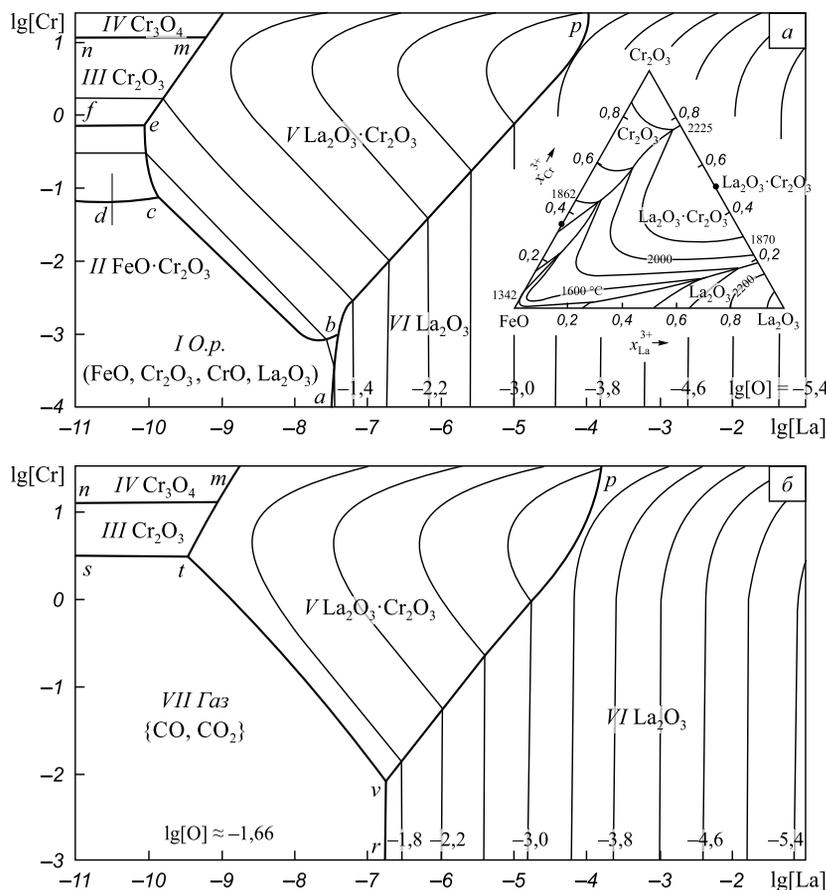


Рис. 5. ПКРМ системы Fe–Cr–La–O–C

Fig. 5. Solubility surfaces in oxygen-containing steel of the system of Fe–Cr–La–O–C

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еланский Г.Н. Сталь и Периодическая система элементов Д.И. Менделеева: Учеб. пособие. – М.: МГВМИ, 2012. – 196 с.
2. Рябчиков И.В. Модификаторы и технологии внепечной обработки железоуглеродистых сплавов. – М.: ЭКОМЕТ, 2008. – 400 с.
3. Голубцов В.А., Шуб Л.Г., Дерябин А.А., Усманов Р.Г. К вопросу о повышении эффективности внепечной обработки стали // *Металлург*. 2006. № 12. С. 59 – 61.
4. Лунев В.В., Шульте Ю.В. Применение комплексных лигатур с РЗМ и ЩЗМ для улучшения свойств литых и деформированных сталей. – В кн.: Влияние комплексного раскисления на свойства сталей: Тематический отраслевой сб. МЧМ СССР. – М.: Металлургия, 1982. С. 33 – 50.
5. Лунев В.В. Разработка теоретических основ внедрения процессов внепечной обработки жидкой электростали РЗМ и ЩЗМ с целью повышения механических и эксплуатационных свойств металла: Автореф. дис. докт. техн. наук. – Днепропетровск, 1984. – 39 с.
6. Силикаты редкоземельных элементов и их аналоги / Н.А. Торопов, И.А. Бондарь, А.Н. Лазарев, Ю.И. Смолин. – Л.: Наука, 1971. – 230 с.
7. Михайлов Г.Г., Леонович Б.И., Кузнецов Ю.С. Термодинамика металлургических процессов и систем. – М.: ИД МИСиС, 2009. – 519 с.
8. Диаграммы состояния силикатных систем. Справочник. Выпуск первый. Двойные системы / Н.А. Торопов, В.П. Барзаковский, В.В. Лапин, Н.Н. Курцева. – Л.: Наука, 1969. – 822 с.
9. Лопато Л.М., Лугин Л.И., Шевченко А.В. Фазовые отношения в системах окись магния – окислы РЗЭ цериевой группы // *Журнал неорганической химии*. 1971. Т. 16. № 1. С. 254 – 257.

10. Саркисов Ю.С., Курзина И.А. Диаграммы состояния двухкомпонентных систем. Методические указания. – Томск: Изд-во Томского архитектурно-строительного университета, 2001. – 38 с.
11. Шевчик А.П. Резистивные материалы и изделия на основе хромита лантана: автореф. дис. докт. техн. наук. – СПб, 2011. – 40 с.
12. Арсеньев П.А., Попов А.И., Филиков В.А. Новые материалы в полупроводниковой электронике. – М.: Высшая школа, 1988. – 80 с.
13. Михайлов Г.Г., Макровец Л.А., Смирнов Л.А. Термодинамическое моделирование фазовых равновесий с оксидными системами, содержащими РЗМ. Сообщение 1. Диаграммы состояния оксидных систем с La₂O₃ // *Вестник ЮУрГУ. Серия Металлургия*. 2014. Т. 14. № 3. С. 5 – 11.
14. Куликов И.С. Раскисление металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 504 с.
15. Туркдоган Е.Т. Физическая химия высокотемпературных процессов / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1985. – 344 с.
16. Bůžek Z. Základní termodynamické údaje o metalurgických reakcích a o interakcích prvků v soustavách významných pro hutnickou teorii a praxi. *Hutnické aktuality*, 1979, vol. 20, no. 1 – 2, pp. 3 – 111.
17. Балковой Ю.В., Алеев Р.А., Баканов В.К. Параметры взаимодействия первого порядка в расплавах на основе железа: Обзор. информ. – М.: Черметинформация, 1987. – 42 с.
18. Скок Ю.Я. Исследование раскислительной способности комплексных сплавов, содержащих ЩЗМ и РЗМ // *Процессы литья*. 2010. № 3 (81). С. 8 – 12.

Поступила 9 сентября 2015 г.

THERMODYNAMIC MODELING OF LANTHANUM INTERACTION PROCESSES USING IRON-BASED METALLIC MELTS

G.G. Mikhailov¹, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Physical Chemistry*

L.A. Makrovets¹, *Engineer of the Chair of the Physical Chemistry (tchla@mail.ru)*

L.A. Smirnov², *Academician of Russian Academy of Sciences (RAS), Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher*

¹ **South Ural State University** (76, V.I. Lenina ave., Chelyabinsk, 454080, Russia)

² **Institute of Metallurgy, UB RAS** (101, Amundsena str., Ekaterinburg, 620016, Russia)

Abstract. Based on thermodynamic analysis of oxide binary and ternary systems having oxide La_2O_3 as a component, the authors have formed the base of energy parameters of the theory of subregular solutions of oxide melts, coupled with an area of metal melts existence. Temperature dependences of the equilibrium constants for steel deoxidation heterogeneous reactions were established. The components solubility surfaces in oxygen-containing steel were constructed for Fe–Al–La–O–C, Fe–Ca–La–O–C, Fe–Mg–La–O–C, Fe–Si–La–O–C, Fe–Cr–La–O–C systems. Diagrams presenting complex deoxidation of steel by alloys and blends of modifiers containing active and alloying elements: Ca, Mg, Si, Al, Cr, La are given. The analysis was made for well – deoxidized and desulfurized metal. At the typical deoxidation scheme, at which the rare-earth metals are introduced after adding into metal of calcium, silicon and aluminum, the produced inclusions calcium are aluminate and magnesium conglomerates. They are the substrates for small fractions and actively interact with liquid components of inclusions and dissolve in it. Thus, La_2O_3 as an independent phase in metal inclusions was not found.

Keywords: state diagram, phase equilibrium, lanthanum, thermodynamics, deoxidation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-877-884

REFERENCES

1. Elanskii G.N. *Stal' i Periodicheskaya sistema elementov D.I. Mendeleeva: Uchebnoe posobie* [Steel and Mendeleev periodic table: Manual]. Moscow: MGVMi, 2012, 196 p. (In Russ.).
2. Ryabchikov I.V. *Modifikatory i tekhnologii vnepechnoi obrabotki zhelezouglerodistykh splavov* [Modifiers and technologies of out-of-furnace treatment of iron-carbon alloys]. Moscow: EKOMET, 2008, 400 p. (In Russ.).
3. Golubtsov V.A., Shub L.G., Deryabin A.A., Usmanov R.G. Treating steel outside the furnace more efficiently. *Metallurgist*. 2006, vol. 50, no. 11–12, pp. 634–637.
4. Lunev V.V., Shul'te Yu.V. Usage of complex alloys with rare-earth metals and alkali-earth metals to improve the properties of cast and deformed steels. In.: *Vliyanie kompleksnogo raskisleniya na svoystva stali: Tematicheskii otrslevoi sb. MChM SSSR* [Influence of complex deoxidization on the properties of steel: Subject sectoral collected articles of ferrous material metallurgy in USSR]. Moscow: Metallurgiya, 1982, pp. 33–50. (In Russ.).
5. Lunev V.V. *Razrabotka teoreticheskikh osnov vnedreniya protsessov vnepechnoi obrabotki zhidkoi elektroitali RZM i ShchZM s tsel'yu povysheniya mekhanicheskikh i ekspluatatsionnykh svoystv metalla: Avtoref. dis. dokt. tekhn. nauk* [Development of theoretical basics of implementation of the processes of out-of-furnace treatment of liquid electric steel with rare-earth and alkali-earth metals in order to increase mechanical and operating properties of metals: Extended Abstract of Dr. Sci. Diss.]. Dnepropetrovsk, 1984, 39 p. (In Russ.).
6. Toropov N.A., Bondar' I.A., Lazarev A.N., Smolin Yu.I. *Silikaty redkozemel'nykh elementov i ikh analogi* [Silicates of rare-earth elements and their analogs]. Leningrad: Nauka, 1971, 230 p. (In Russ.).
7. Mikhailov G.G., Leonovich B.I., Kuznetsov Yu.S. *Termodinamika metallurgicheskikh protsessov i sistem* [Thermodynamics of metallurgical processes and systems]. Moscow: MISiS, 2009, 519 p. (In Russ.).
8. Toropov N.A., Barzakovskii V.P., Lapin V.V., Kurtseva N.N. *Diagrammy sostoyaniya silikatnykh sistem. Spravochnik. Vypusk 1. Dvoynye sistemy* [Constitution diagrams of silicate systems. Reference-book. Issue 1. Double systems]. Leningrad: Nauka, 1969, 822 p. (In Russ.).
9. Lopato, L.M., Lugin, L.I., Shevchenko, A.V. Phase Relationships in Magnesium Oxide-Cerium Subgroup R.E.E. Oxide Systems, *Russ. J. Inorg. Chem.*, 1971, vol. 16, no. 1, pp. 131–133.
10. Sarkisov Yu.S., Kurzina I.A. *Diagrammy sostoyaniya dvukhkompontentnykh sistem. Metodicheskie ukazaniya* [State diagrams of two-component systems. Instructional guidelines]. Tomsk: Izd-vo Tomskogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta, 2001, 38 p. (In Russ.).
11. Shevchik A.P. *Rezistivnye materialy i izdeliya na osnove khromita lantana: Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk* [Resistive materials and items based on lanthanum chromite: Extended Abstract of Dr. Sci. Diss.]. St. Petersburg, 2011, 40 p. (In Russ.).
12. Arsen'ev P.A., Popov A.I., Filikov V.A. *Novye materialy v poluprovodnikovoi elektronike* [New materials in semiconductor electronics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1988, 80 p. (In Russ.).
13. Mikhailov G.G., Makrovets L.A., Smirnov L.A. Thermodynamic modeling of phase equilibrium with oxidation systems, containing rare-earth metals. Report 1. Constitution diagrams of oxidation systems with La_2O_3 . *Vestnik YuUrGU. Seriya Metallurgiya*. 2014, vol. 14, no. 3, pp. 5–11. (In Russ.).
14. Kulikov I.S. *Raskislenie metallov* [Metal deoxidation]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 504 p. (In Russ.).
15. 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.).
16. Bůžek Z. Základní termodynamické údaje o metalurgických reakcích a o interakcích prvků v soustavách významných pro hutnickou teorii a praxi. *Hutnické aktuality*, 1979, vol. 20, no. 1–2, pp. 3–111.
17. Balkovoi Yu.V., Aleev R.A., Bakanov V.K. *Parametry vzaimodeistviya pervogo porjadka v rasplavakh na osnove zheleza: Obzor. inform* [Interaction parameters of the first order in iron-based melts: Information review]. Moscow: Chermetinformatsiya, 1987, 42 p. (In Russ.).
18. Skok Yu.Ya. Research of deoxidizing ability of complex alloys, containing rare-earth and alkali-earth metals. *Protsessy lit'ya*. 2010, no. 3 (81), pp. 8–12. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was supported by RFBR grant no. 13-08-12167.

Received September 9, 2015

УДК 666.782:536.7

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ РАВНОВЕСИЯ В СИСТЕМЕ КРЕМНИСТЫЙ СПЛАВ–ШЛАК–ГАЗ

Якушевич Н.Ф., д.т.н., профессор кафедры цветных металлов и химической технологии
Полях О.А., к.т.н., доцент кафедры цветных металлов и химической технологии (kafcmet@sibsiu.ru)
Галевский Г.В., д.т.н., профессор, директор Института металлургии и материаловедения

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

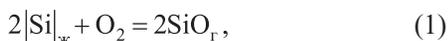
Аннотация. Проанализировано состояние исходных термодинамических данных базовых химических реакций взаимодействия кремния с кислородом, протекающих с образованием монооксида и диоксида кремния. В качестве базового параметра для оценки фазово-химических равновесий в системах, содержащих кислород, принимается парциальное давление кислорода в газовой фазе. Для кремнистых сплавов со значениями $X_{\text{Si}} = 0,1 - 1,0$ в диапазоне температур 1700 – 2300 К рассчитаны равновесные значения P_{SiO} и P_{O_2} в газовой фазе, состоящей из кислорода и монооксида кремния. Для систем сплав–шлак–углерод–газ определено влияние активности оксида кремния в шлаковом расплаве на равновесный состав газовой фазы. Показано, что в высококремнистых сплавах ($a_{\text{Si}} > 0,2$) наибольшее влияние на состав газовой фазы оказывает температура. На диаграмме фазово-химических равновесий системы Si–O–C показано, что границы моновариантных равновесий SiO₂–C–газ, SiO₂–SiC–газ и SiO₂–Si–газ при уменьшении активности SiO₂ в шлаковом расплаве смещаются в сторону высоких температур и при заданной температуре концентрации монооксида кремния и кислорода понижаются.

Ключевые слова: кремнистый сплав, шлаковый расплав, активности, термодинамические равновесия.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-884-890

Расплавы с высоким содержанием кремния взаимодействуют с кислородом с образованием газообразного монооксида кремния (SiO) и твердого или жидкого диоксида (SiO₂). Пренебрегая испарением компонентов металлического расплава и возможным испарением оксидов шлакового расплава (при температурах менее 2000 К упругость пара $P_{\text{SiO}}^{\circ} < 2$ Па и $P_{\text{SiO}_2}^{\circ} < 0,07$ Па [1]), равновесный состав газа, состоящего в основном из SiO и O₂, можно оценить из констант равновесия приведенных ниже реакций (1) – (4) (стехиометрические коэффициенты реагентов приведены к 1 моль O₂):

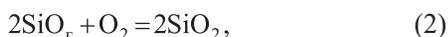
– для двухфазного (бивариантного) равновесия (металлический расплав – газ)



$$K_1 = P_{\text{SiO}_{\text{г}}}^2 a_{\text{Si}}^{-2} P_{\text{O}_2}^{-1}, \quad (1.1)$$

$$\ln K_1 = -2\Delta G_{\text{SiO}}^{\circ} (RT)^{-1}; \quad (1.2)$$

– при сверхравновесных концентрациях кислорода в газовой фазе может протекать доокисление монооксида кремния до SiO₂ (или, наоборот, диссоциация SiO₂) по реакции



$$K_2 = a_{\text{SiO}_2}^2 P_{\text{SiO}_{\text{г}}}^{-2} P_{\text{O}_2}^{-1}, \quad (2.1)$$

$$\ln K_2 = -2(\Delta G_{\text{SiO}_2}^{\circ} - \Delta G_{\text{SiO}}^{\circ})(RT)^{-1}. \quad (2.2)$$

Одновременное протекание реакций (1) и (2) характеризуется параметрами трехфазного моновариантного равновесия (металлический расплав–шлак–газ), определяемых из констант равновесия реакции



$$K_3 = a_{\text{SiO}_2} a_{\text{Si}}^{-1} P_{\text{O}_2}^{-1}, \quad (3.1)$$

$$\ln K_3 = -\Delta G_{\text{SiO}_2}^{\circ} (RT)^{-1} \quad (3.2)$$

и реакции



$$K_4 = P_{\text{SiO}}^2 a_{\text{Si}}^{-1} a_{\text{SiO}_2}^{-1}, \quad (4.1)$$

$$\ln K_4 = -(2\Delta G_{\text{SiO}}^{\circ} - \Delta G_{\text{SiO}_2}^{\circ})(RT)^{-1}. \quad (4.2)$$

Из констант равновесия реакций (1), (2) определяются

$$P_{\text{O}_2} = K_1^{-1} a_{\text{Si}}^{-2} P_{\text{SiO}}^2 = K_2^{-1} a_{\text{SiO}_2}^2 P_{\text{SiO}}^{-2}; \quad (1.3)$$

$$P_{\text{SiO}} = K_1^{1/4} K_2^{-1/4} a_{\text{SiO}_2}^{1/2} a_{\text{Si}}^{-1/2}. \quad (2.3)$$

Для трехфазного равновесия (металл – шлак – газ) получаем

$$P_{O_2} = K_3^{-1} a_{Si}^{-1} a_{SiO_2}, \quad (3.3)$$

$$P_{SiO} = K_4^{1/2} a_{Si}^{1/2} a_{SiO_2}^{1/2}. \quad (4.3)$$

В сочетании с константами равновесия реакций (1) и (2) определяются численные значения констант

$$K_4 = K_1 K_3^{-1}; \quad (4.4)$$

$$K_2 = K_3^2 K_1^{-1}. \quad (2.4)$$

Подставив выражение (2.4) в уравнения (1.3) и (2.3), можно записать для двухфазного состояния

$$P_{O_2} = K_3^{-1} a_{Si} a_{SiO_2}; \quad (3.4)$$

$$P_{SiO} = K_1^{-3/4} K_3^2 a_{Si}^{1/2} a_{SiO_2}^{1/4}. \quad (3.5)$$

Таким образом, состав газовой фазы над кремнистыми сплавами при заданных температуре и давлении может быть однозначно определен при известных значениях a_{Si} и a_{SiO_2} и констант равновесия базовых реакций K_1 и K_3 , найденных из корректных зависимостей $\Delta G_1^\circ = f(T)$ и $\Delta G_3^\circ = f(T)$.

Точность термодинамических оценок зависит от точности принимаемых исходных термодинамических

параметров: $a_{Si} = f(x_i, T)$, $a_{(SiO_2)} = f(x_{(SiO_2)}, x_{(Me_xO)}, T)$, $\Delta G_T^\circ(1) = f(T)$, $\Delta G_T^\circ(3) = f(T)$.

Для реакции (3) значения $\Delta G_T^\circ(3) = f(T)$ определялись и уточнялись многократно. На рис. 1, а приведены значения $\Delta G_T^\circ = f(T)$ для реакций (1) и (2) по разным литературным источникам [1 – 13]. Ранее часто использовались [2, 3] данные Ричардсона [4], в настоящее время наиболее часто используются справочники [1, 5 – 8]. Сведения, приведенные справочнике [1], а также аналогичных зарубежных изданий, часто используются в базах данных различных программ («Астра», «Плазма», «Терра» и др.), реализуемых в компьютерных расчетах, однако некоторые авторы [11] отдают предпочтение данным, приведенным в работе [9]. В настоящем исследовании для анализа физико-химических процессов, протекающих в интервале температур 1690 – 1996 К, использовались уравнения, рекомендованные в работе [10], полученные с использованием данных справочника [1]:

– трехчленное

$$\Delta G_{1690-1996}^\circ = -981\,862 - 44,877 \lg T + 363,87 \frac{\text{Дж}}{\text{моль } O_2}, \quad (1.5)$$

или дающее практически одинаковые результаты двухчленное

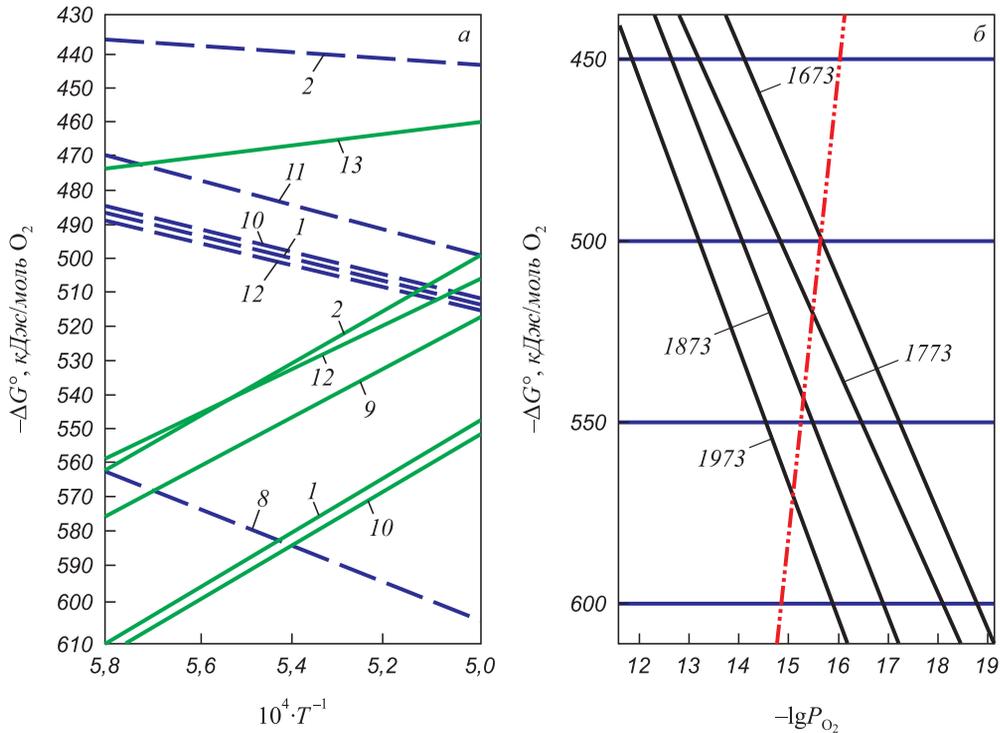


Рис. 1. Зависимости $\Delta G^\circ = f(T)$ (а) для реакций (3) —, (1) ---; (6) ----, а также изотермы зависимости $-\lg P_{O_2} = -\Delta G^\circ / (RT)$ (б): $\Delta G^\circ = f(T)$ для реакции (3) (—); (6) -----. Цифры у линий – номера источников по библиографическому списку

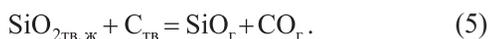
Fig. 1. Dependences $\Delta G^\circ = f(T)$ (a) for reactions (3) —, (1) ---; (6) ----, as well as dependence isotherms $-\lg P_{O_2} = -\Delta G^\circ / (RT)$ (b): $\Delta G^\circ = f(T)$ for reaction (3) (—); (6) -----. The numbers by the line – source numbers according to the references

$$\Delta G_{1690-1996}^{\circ} = -946\,250 + 197,88T \frac{\text{Дж}}{\text{моль O}_2}, \quad (1.6)$$

которое с точностью 0,2 % соответствует данным справочника [5].

Рассчитанные по этим уравнениям значения $\lg P_{O_2} = f(\Delta G_3^{\circ})$ для температур 1673, 1773, 1873 и 1973 К представлены на рис. 1, б, а влияние параметров a_{Si} и a_{SiO_2} на изменение величины P_{O_2} показано на рис. 2, из которого видно, что для шлаков, насыщенных кремнеземом ($a_{SiO_2} = 1$), равновесные значения $\lg P_{O_2}$ снижаются с $-14,7$ при 1973 К до $-16,05$ при 1873 К и до $-17,56$ при 1773 К, и эта тенденция сохраняется при снижении параметра a_{SiO_2} . Снижение a_{SiO_2} с 1,00 до 0,05 практически равнозначно снижению температуры на 100 К. Для окисления сплавов с низким содержанием кремния ($a_{Si} < 0,2$) необходимо повышение концентрации кислорода в газовой фазе на 2 – 3 порядка как для кислых шлаков ($a_{SiO_2} > 0,5$), так и для основных ($a_{SiO_2} < 0,5$).

Значения константы равновесия реакции (1) определялись различными методами как экспериментальными (масспектроскопия и др.) [14, 15, 19], так и расчетными, в том числе с использованием уравнения



Используя достаточно надежные значения ΔG_{CO}° [5] для реакции



$$G_{1500-2000}^{\circ}(6) = -118\,000 - 84,35T \frac{\text{Дж}}{\text{моль CO}}, \quad (6.1)$$

получено

$$\Delta G^{\circ}(5) = \Delta G_{SiO}^{\circ} + \Delta G_{CO}^{\circ} - \Delta G_{SiO_2}^{\circ}, \quad (5.1)$$

$$G_{1500-2000}^{\circ}(5) = 676\,626 + 385,97T \frac{\text{Дж}}{\text{моль CO}}. \quad (5.2)$$

Разброс значений ΔG° для реакции образования монооксида кремния по реакции (1) по данным разных авторов [1, 2, 8, 10 – 12] весьма значительный (рис. 1, а), что связано с трудностями достижения равновесных состояний системы, высокой летучестью монооксида кремния, конденсации его из газовой фазы при понижении температуры, образования жидких растворов с диоксидом кремния [19, 20].

Для реакций (1) и (4), протекающих с образованием монооксида кремния, часто принимаются следующие зависимости $\Delta G^{\circ} = f(T)$ [1, 10, 12]:

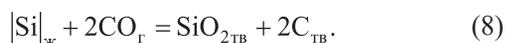
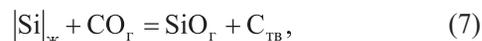
$$G^{\circ}(1) = -290\,720 + 41,18T \lg T - 245,52T \frac{\text{Дж}}{\text{моль O}_2}, \quad (1.4)$$

$$G^{\circ}(1) = -330\,600 - 89,04T \frac{\text{Дж}}{\text{моль O}_2}, \quad (1.5)$$

$$G^{\circ}(4) = 741\,142 + 86,05T \lg T - 609,32T \frac{\text{Дж}}{\text{моль O}_2}. \quad (4.5)$$

На рис. 3 представлены зависимости концентраций монооксида кремния от температуры и парциального давления кислорода в газовой фазе, полученные с использованием уравнений (3.5), (1.3), (2.3). Рассчитанные по уравнениям (3.4) и (3.5) значения $P_{SiO} = f(a_{Si}, P_{O_2}, T)$ представлены также на рис. 2 в виде линий постоянных значений $-\lg P_{SiO}$ в диапазоне $(-0,2) - (-7,5)$.

В присутствии в газовой фазе монооксида углерода кремний металлического расплава может взаимодействовать с ним по реакциям



Образовавшийся в качестве продукта реакций (7), (8) углерод растворяется в металлическом расплаве вплоть до его насыщения, а при охлаждении выделяется из расплава в виде сажистого углерода или в виде карбида кремния (SiC), образующегося в высококремнистых сплавах по реакции



В газовой фазе могут протекать также реакции взаимодействия монооксидов кремния и углерода с образо-

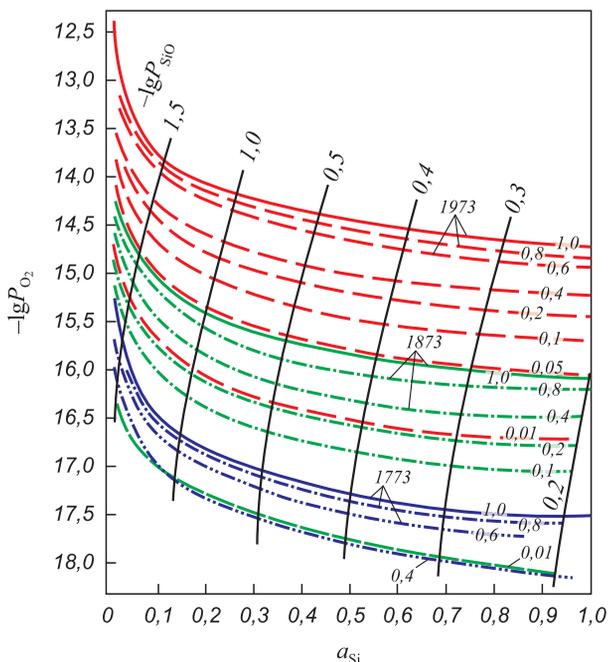


Рис. 2. Зависимость для реакции $-\lg P_{O_2} = f(a_{Si}, a_{SiO_2}, T)$ (3).

Цифры у кривых – значения a_{SiO_2} ;

— — зависимость $-\lg P_{SiO} = f(a_{Si}, -\lg P_{O_2})$

Fig. 2. Dependence for reaction $-\lg P_{O_2} = f(a_{Si}, a_{SiO_2}, T)$ (3).

The numbers by the curves – value a_{SiO_2} ;

— — dependence $-\lg P_{SiO} = f(a_{Si}, -\lg P_{O_2})$

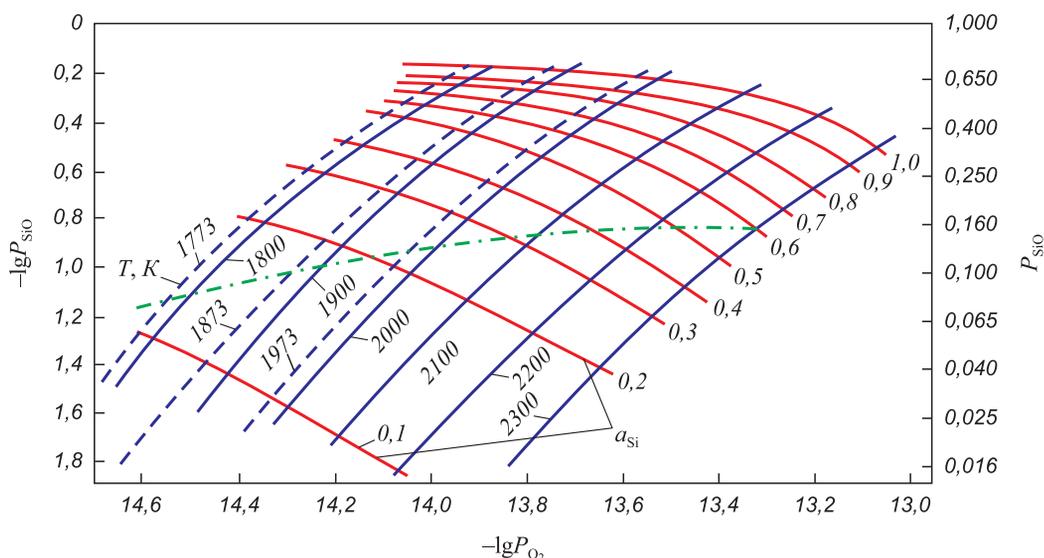
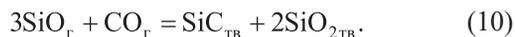


Рис. 3. Зависимость P_{SiO} , $lg P_{SiO}$ равновесной концентрации монооксида кремния от парциального давления кислорода в газовой фазе, температуры и активности кремния в металлическом расплаве; - - - условия равновесия реакции $SiO_r + 1/2 O_2 = SiO_2 (a_{SiO_2} = 1)$

Fig. 3. Dependence P_{SiO} , $lg P_{SiO}$ of equilibrium density of silicon monoxide on partial oxygen pressure in a gas phase, temperature and silicon activity in metal melt; - - - conditions of the reaction equilibrium $SiO_r + 1/2 O_2 = SiO_2 (a_{SiO_2} = 1)$

ванием твердых продуктов (C, SiO_2 , SiC) по реакциям (5), (10) [20, 21]:



Так как в высококремнистых сплавах растворимость углерода мала, расплав (по крайней мере, его поверхностный слой) быстро насыщается углеродом, что в дальнейшем приводит к образованию плотных оксикарбидных пленок ($SiO_x C_y$), и делает невозможным проплавление сплава без интенсивного перемешивания.

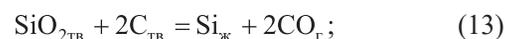
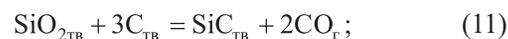
Равновесные значения $P_{CO} = f(T)$ для кремнистых сплавов можно определить по равновесным значениям $P_{O_2} = f(T, x_{[Si]})$ для сплавов заданного состава из константы равновесия реакции (6) (рис. 1). Очевидно, что при значениях P_{CO} больших, чем равновесные для расплавов с заданными параметрами, монооксид углерода будет являться окислителем для кремния, что необходимо также учитывать при реализации процессов, протекающих в вакууме или в атмосфере нейтральных газов.

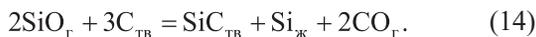
Области термодинамически стабильного существования твердофазных продуктов в зависимости от температуры, концентрации монооксида кремния в газовой фазе (P_{SiO}), состоящей из монооксидов кремния и углерода ($Si + CO$), активности кремния в металлическом расплаве и активности кремнезема (a_{SiO_2}) в шлаковом расплаве при общем давлении газовой фазы $P_{общ} = P_{SiO} + P_{CO} = 1$ атм представлены на рис. 3.

По аналогии с опубликованными ранее такого рода диаграммами состояния системы Si-O-C [16-18, 10] здесь представлены: область термодинамически ста-

бильного сосуществования оксидной фазы с газовой фазой, содержащей монооксид кремния (бивариантное равновесие), ограниченная справа линиями ($G_1 - G_1''$) - ($G_1 - G_2$) - ($G_2 - G_2''$), представляющих, соответственно, трехфазные (моновариантные) равновесия ($SiO_2 - C_{тв} - газ$), ($SiO_2 - SiC_{тв} - газ$), ($SiO_2 - Si_{ж} - газ$) для условий $a_{SiO_2} = 1$, $a_C = 1$, $a_{Si} = 1$; область жидкого кремния, ограниченная линиями моновариантных равновесий $G_2 - G_2''$ ($a_{SiO_2} = 1$, $a_{Si} = 1$) и $G_2 - G_2'$ ($a_{Si} = 1$); область твердого углерода (графита), ограниченная линиями $G_1 - G_1''$ и $G_1 - G_1'$; область карбида кремния $G_1 - G_2 - G_2' - G_1'$, ограниченная линиями трехфазных моновариантных равновесий $SiO_2 - SiC - газ$ ($G_1 - G_2$), $Si_{ж} - SiC - газ$ ($G_2 - G_2'$), $SiC - C_{тв} - газ$ ($G_1 - G_1'$). Область карбида кремния распространяется далее в сторону высоких температур вплоть до виртуальной инвариантной точки G_4 (Si-SiC-C-газ, $T = 3193$ К), которая, как показано в работе [8], фактически не существует вследствие резкого увеличения при температурах выше 2500 К концентрации в газовой фазе паров Si, Si_2 , Si_3 , SiC, SiC_2 , Si_2C и др., в связи с чем область существования карбида кремния ограничена на диаграмме изотермой 2300 К ($G_2' - G_1'$).

Точки G_1 , G_2 , G_3 , (G_4) характеризуют четырехфазные инвариантные равновесия, описываемые реакциями





Моновариантное равновесие вдоль кривой $G_3 - G_4$, описываемое реакцией



характеризуется как нестабильное, однако в реальных технологических процессах это взаимодействие имеет место, а в случаях, когда активность кремния в сплаве мала, реакция (15) имеет преимущественное развитие. Аналогично моновариантное равновесие вдоль кривой $G_1 - G'_1$ описывается реакцией



Снижение концентрации и, соответственно, активности кремния в металлическом расплаве приводит к

понижению равновесной концентрации монооксида кремния в газовой фазе по отношению как к реакции (13), так и к реакции (15).

Снижение активности кремнезема (a_{SiO_2}) в шлаковом расплаве приводит к смещению границы области существования оксидного расплава в сторону более высоких температур (рис. 4). При заданной температуре (например, 1900 К) при понижении активности кремнезема в шлаковом расплаве концентрация монооксида кремния в газовой фазе снижается на порядок (с 0,02 при $a_{\text{SiO}_2} = 1$ до 0,002 при $a_{\text{SiO}_2} = 0,1$).

На рис. 3 показаны также линии постоянных значений параметра $\lg P_{\text{O}_2} = f(T, x_{\text{SiO}})$, которые показывают, что при незначительном повышении концентрации кислорода в газовой фазе (например, с $P_{\text{O}_2} = 1 \cdot 10^{-14,6}$ до $P_{\text{O}_2} = 1 \cdot 10^{-14,4}$) равновесная концентрация при заданной температуре для монооксида кремния (x_{SiO}) увеличивается кратно (с 0,05 до 0,15 при 1800 К и с 0,02 до 0,06 при 1900 К), что может существенно повлиять на улет

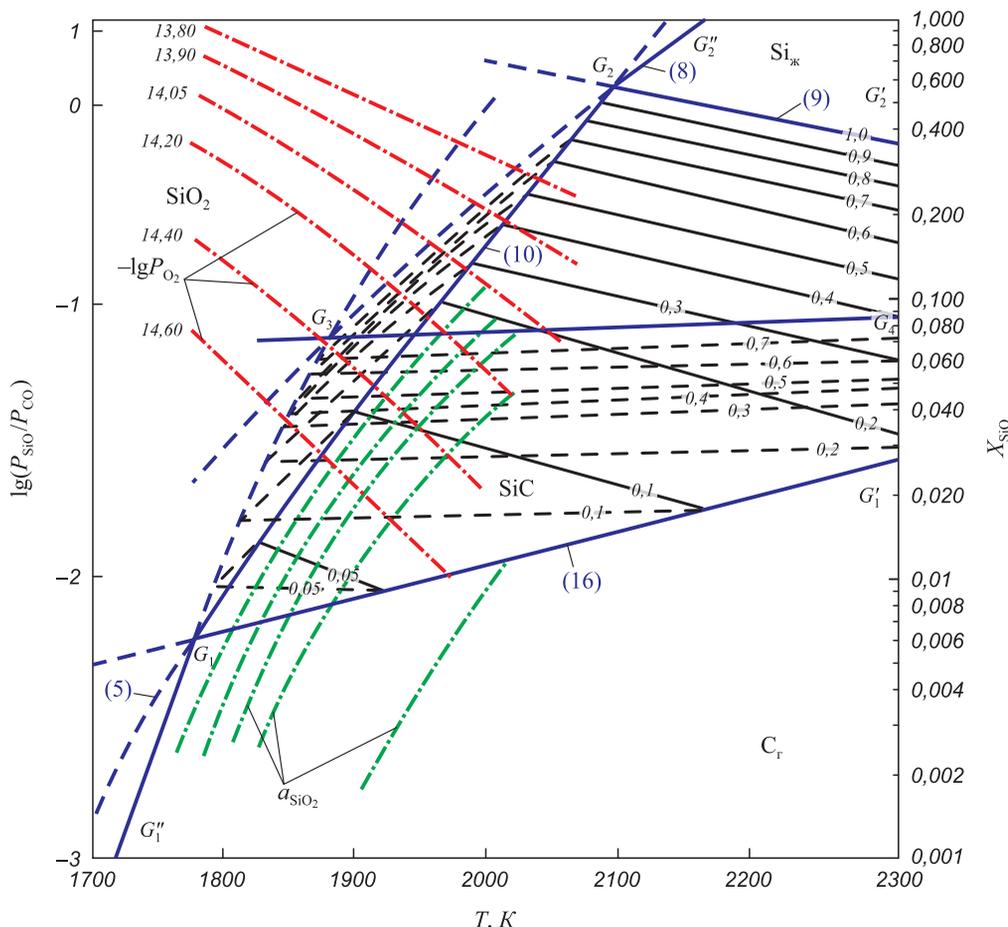


Рис. 4. Диаграмма фазово-химических равновесий системы $|\text{Si}|_{\text{MeX}_i} - (\text{SiO}_2)_{\text{шлак}} - (\text{SiO} + \text{CO})_{\text{газ}} - \text{C}_{\text{ТВ}} - \text{SiC}_{\text{ТВ}}$:
 — стабильные трехфазные равновесия (8) — $(\text{SiO}_2)_{\text{шлак}} - \text{C}_{\text{ТВ}} - \text{газ}(\text{SiO} + \text{CO})$; (9) — $|\text{Si}|_{\text{Ж}} - \text{SiC}_{\text{ТВ}} - \text{газ}$; (10) — $(\text{SiO}_2) - \text{SiC} - \text{газ}$;
 (16) — $\text{C}_{\text{ТВ}} - \text{SiC}_{\text{ТВ}} - \text{газ}$; - - - метастабильные трехфазные для реакций равновесия (5), (7), (10), (15);
 — и - - - то же при значениях $a_{\text{Si}} = 0,9 \div 0,05$; - - - для реакции (10) при $a_{\text{SiO}_2} = 0,8 \div 0,1$; - - - - $-\lg P_{\text{O}_2} = f(x_{\text{SiO}}, T)$

Fig. 4. Diagram of phase-chemical equilibrium of the system of $|\text{Si}|_{\text{MeX}_i} - (\text{SiO}_2)_{\text{шлак}} - (\text{SiO} + \text{CO})_{\text{газ}} - \text{C}_{\text{ТВ}} - \text{SiC}_{\text{ТВ}}$:
 — stable three-phase equilibrium (8) — $(\text{SiO}_2)_{\text{шлак}} - \text{C}_{\text{ТВ}} - \text{газ}(\text{SiO} + \text{CO})$; (9) — $|\text{Si}|_{\text{Ж}} - \text{SiC}_{\text{ТВ}} - \text{газ}$; (10) — $(\text{SiO}_2) - \text{SiC} - \text{газ}$;
 (16) — $\text{C}_{\text{ТВ}} - \text{SiC}_{\text{ТВ}} - \text{газ}$; - - - metastable for three-phase equilibrium reactions (5), (7), (10), (15);
 — and - - - the same at the values of $a_{\text{Si}} = 0,9 \div 0,05$; - - - for reaction (10) at $a_{\text{SiO}_2} = 0,8 \div 0,1$; - - - - $-\lg P_{\text{O}_2} = f(x_{\text{SiO}}, T)$

кремния в виде монооксида SiO_r , но обеспечивает возможность получения сплава с более высоким содержанием кремния (на 0,1 – 0,2 x_{Si}). Аналогичный эффект может быть достигнут при повышении температуры на 100 К (при $P_{\text{SiO}} = 0,1$ повышение температуры с 1900 до 2000 К приводит к снижению $\lg P_{\text{O}_2}$ с –14,4 до –14,2).

Выводы. Показано, что для описания фазово-химических равновесий в системе кремнистый сплав – шлак – газ достаточно иметь корректные термодинамические характеристики $\Delta G^\circ = f(T)$ четырех, а в присутствии углерода пяти реакций: $2|\text{Si}| + \text{O}_2 = 2\text{SiO}_r$, $2\text{SiO}_r + \text{O}_2 = 2\text{SiO}_2$, $|\text{Si}| + \text{O}_2 = 2\text{SiO}_2$, $|\text{Si}| + \text{SiO}_2 = 2\text{SiO}_r$, $\text{C} + 1/2\text{O}_2 = \text{CO}$. Рассчитаны и графически представлены зависимости равновесных значений $\lg P_{\text{O}_2} = f(x_{\text{Si}}, T, x_{\text{SiO}_2})$ для реакций $|\text{Si}| + \text{O}_2 = \text{SiO}_2$ и $2|\text{Si}| + \text{O}_2 = 2\text{SiO}_r$. Установлено, что в присутствии углерода в системе Si–O–C равновесная концентрация монооксида кремния в газовой фазе лимитируется комплексом взаимосвязанных факторов: температурой, концентрацией кремния в металлическом расплаве, окислительной способностью газовой фазы, активностью кремнезема (a_{SiO_2}) в оксидном расплаве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Т. 1 – 4 / Под ред. В.П. Глушко. – М.: Наука, 1979 – 1982. – 1620 с.
2. Елютин В.П. Производство ферросплавов. – М.: Metallurgia, 1957. – 436 с.
3. Гельд П.В., Есин О.А. Процессы высокотемпературного восстановления. – Свердловск: Metallurgizdat, 1957. – 645 с.
4. Richardson F.D., Joffers J.H.T. / Iron and steel Inst. 1948. 160. 4.3. P. 261 – 270.
5. Эллиот А.Ф., Глейзер М., Рамакришна В. Термохимия сталеплавильных процессов / Пер. с англ. – М.: Metallurgia, 1969. – 252 с.
6. JANAF Thermochemical Tables. Sec. NBS USA, Washington, 1971. P. 1100.
7. JANAF Thermochemical Tables. Michigan, US. Department of Commerce / National Bureau of Standards / Institute for Applied Technology, 1965–1968, Juni 1971, Supplements 1974, 1975.
8. Куликов И.С. Термодинамика оксидов. Справочник. – М.: Metallurgia, 1986. – 344 с.
9. Кубашевский О., Олкок К.Б. Metallургическая термохимия / Пер. с англ. – М.: Metallurgia, 1982. – 392 с.
10. Толстогузов Н.В. Теоретические основы и технология плавки кремнистых и марганцевых сплавов. – М.: Metallurgia, 1992. – 239 с.
11. Зубов В.Л., Гасик М.И. Электрометаллургия ферросилиция. – Днепропетровск: Системные технологии, 2002. – 704 с.
12. Григорян В.А., Беляничков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы сталеплавильных процессов. – М.: Metallurgia, 1979. – 256 с.
13. Самсонов Г.В. Физико-химические свойства окислов. – М.: Metallurgia, 1969. – 455 с.
14. Зайцев А.И., Могутнов Б.М., Шахназов Е.Х. Физическая химия металлургических шлаков. – М.: Интерконтакт Наука, 2008. – 352 с.
15. Гельд П.В., Баум Б.А., Петрушевский Н.С. Расплавы ферросплавного производства. – М.: Metallurgia, 1973. – 288 с.
16. Kriwsky W.A., Schuman K. // Trans of metals. Soc. AJME. 1961. Vol. 221. P. 898–903.
17. Рябчиков И.В. Термодинамическое исследование системы Si – O – C при высоких температурах // Изв. АН СССР. Металлы. 1966. № 2. С. 14 – 18.
18. Müller M.B., Olsen S.E., Tuset I.K. Heat and Mass Transfer in the ferrosilicon process // Scandinavian of metallurgy. Scand. Journ. of Met. 1972. № 1. P. 145–155.
19. Якушевич Н.Ф., Галевский Г.В. Взаимодействие углерода с оксидами кальция, кремния, алюминия. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 1999. – 250 с.
20. Якушевич Н.Ф., Коврова О.А. Физико-химические взаимодействия в руднотермических печах при плавке кремния // Изв. вуз. Черная металлургия. 1997. № 8. С. 3 – 8.
21. Полях О.А., Галевский Г.В., Якушевич Н.Ф. Анализ физико-химических процессов образования и исследование свойств микрокремнезема // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2005. Вып. 15. С. 49–55.

Поступила 9 декабря 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. VOL. 58. No. 12, pp. 884–890.

THERMODYNAMIC EQUILIBRIUM IN THE SYSTEM OF SILICON ALLOY – SLAG – GAS

N.F. Yakushevich, Dr.Sci. (Eng.), Professor of Chair “Non-ferrous Metallurgy and Chemical Engineering”

O.A. Polyakh, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of Chair “Non-ferrous Metallurgy and Chemical Engineering”
(kafcm@sisbiu.ru)

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

Siberian State Industrial University (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

Abstract. The condition of the original thermodynamic data of base chemical reactions between silicon and oxygen flowing to form carbon monoxide and silicon dioxide have been analyzed. As a base for the parameter estimation of phase and chemical equilibrium in

systems containing oxygen, the oxygen partial pressure was taken in the gas phase. The equilibrium value P_{SiO} and P_{O_2} was calculated for silicon alloys with values $X_{\text{Si}} = 0.1–1.0$ at temperature range 1700 – 2300 K in a gas phase consisting of oxygen and silicon monoxide. The effect of the silicon oxide activity in the slag melt on the equilibrium composition of the gas phase was determined for systems “alloy–slag–carbon–dioxide”. It has been shown that temperature has the greatest effect on the gas phase composition at high-silicon alloys ($a_{\text{Si}} > 0.2$). The diagram of phase and chemical equilibrium of Si–O–C shows that the boundaries of the monovariant SiO_2 –C–gas, SiO_2 –SiC–gas and SiO_2 –Si–gas with a decrease in activity SiO_2 in the melted slag are shifted toward higher temperatures and at a given temperature the concentration of silicon monoxide and oxygen are reduced.

Keywords: silicon alloys, molten slag, activity, thermodynamic equilibrium.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-884-890

REFERENCES

1. *Termodinamicheskie svoystva individual'nykh veshchestv*. T. 1–4 [Thermodynamic properties of individual substances, vols. 1–4]. Glushko V.P. ed. Moscow: Nauka, 1979–1982, 1620 p. (In Russ.).
2. Elyutin V.P. *Proizvodstvo ferrosplavov* [Ferroalloy production]. Moscow: Metallurgiya, 1957, 436 p. (In Russ.).
3. Gel'd P.V., Esin O.A. *Protsessy vysokotemperaturnogo vosstanovleniya* [Processes of high-temperature reduction]. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1957, 645 p. (In Russ.).
4. Richardson F.D., Joffers J.H.T. *Iron and steel Inst.* 1948. 160. 4.3, pp. 261–270.
5. Elliott John F., Gleiser Molly, Ramakrishna V. *Thermochemistry for Steelmaking*. Addison - Wesley Inc. 1963. (Russ.ed.: Elliott J., Gleiser M., Ramakrishna V. *Termokhimiya staleplavil'nykh protsessov*. Moscow: Metallurgiya, 1969, 252 p.).
6. *JANAF Thermochemical Tables*. Sec. NBS USA, Washington, 1971. P. 1100.
7. *JANAF Thermochemical Tables*. Michigan, US. Department of Commerce. National Bureau of Standards. Institute for Applied Technology, 1965–1968, Juni 1971, Supplements 1974, 1975.
8. Kulikov I.S. *Termodinamika oksidov. Spravochnik* [Thermodynamics of oxides. Reference-book]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 344 p. (In Russ.).
9. Kubaschewski O., Alcock C.B. *Metallurgical Thermochemistry*. Oxford, New York, Pergamon Press. 1967. (Russ.ed.: Kubaschewski O., Alcock C.B. *Metallurgicheskaya termokhimiya*. Moscow: Metallurgiya, 1982. 392 p.).
10. Tolstoguzov N.V. *Teoreticheskie osnovy i tekhnologiya plavki kremnistykh i margantsevykh splavov* [Thermal basis and melting technologies of silicon and manganese alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1992, 239 p. (In Russ.).
11. Zubov V.L., Gasik M.I. *Elektrometallurgiya ferrosilitsiya* [Electrometallurgy of ferrosilicon]. Dnepropetrovsk: Sistemnye tekhnologii, 2002. 704 p. (In Russ.).
12. Grigoryan V.A., Belyanchikov L.N., Stomakhin A.Ya. *Teoreticheskie osnovy staleplavil'nykh protsessov* [Theoretical basics of steel-smelting processes]. Moscow: Metallurgiya, 1979, 256 p. (In Russ.).
13. Samsonov G.V. *Fiziko-khimicheskie svoystva okislov* [Physical and chemical properties of oxides]. Moscow: Metallurgiya, 1969, 455 p. (In Russ.).
14. Zaitsev A.I., Mogutnov B.M., Shakhnazov E.Kh. *Fizicheskaya khimiya metallurgicheskikh shlakov* [Physical chemistry of metallurgical slags]. Moscow: Interkontakt Nauka, 2008, 352 p. (In Russ.).
15. Gel'd P.V., Baum B.A., Petrushevskii N.S. *Rasplavy ferrosplavnogo proizvodstva* [Melts of ferroalloy production]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 288 p. (In Russ.).
16. Kriwsky W.A., Schuman K. *Trans of metals. Soc. AJME*. 1961, vol. 221, pp. 898–903.
17. Ryabchikov I.V. Thermodynamic investigation of C – O – C system at high temperatures. *Izvestiya AN SSSR. Metall.* 1966, no. 2, pp. 14–18. (In Russ.)
18. Müller M.B., Olsen S.E., Tuset I.K. Heat and Mass Transfer in the ferrosilicon process. *Scand. Journ. of Met.* 1972, no. 1, pp. 145–155.
19. Yakushevich N.F., Galevskii G.V. *Vzaimodeistvie ugleroda s oksidami kal'tsiya, kremniya, alyuminiya* [Interaction of carbon with oxides of calcium, silicon, aluminum]. Novokuznetsk: SibGIU, 1999, 250 p. (In Russ.).
20. Yakushevich N.F., Kovrova O.A. Physical and chemical interactions in ore-thermal furnaces at silicon smelting. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1997, no. 8, pp. 3–8. (In Russ.).
21. Polyakh O.A., Galevskii G.V., Yakushevich N.F. Analysis of physical and chemical processes of formation and researches of microsilica properties. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii*. 2005, vol. 15, pp. 49–55. (In Russ.).

Received December 9, 2014

УДК 669.18.002.61:537.533.3

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ВАКУМИРОВАННОЙ АУСТЕНИТНОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ МЕТОДОМ РАСТРОВОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ*

Токовой О.К.¹, д.т.н., профессор кафедры физической химии (otok@mail.ru)
Шабуров Д.В.², к.т.н., начальник технического управления

¹ Южно-Уральский государственный университет
(454080, Россия, г. Челябинск, пр. Ленина, 76)

² ОАО «Челябинский металлургический комбинат»
(454047, Россия, г. Челябинск, ул. 2-ая Павелецкая, 14)

Аннотация. Методом растровой электронной микроскопии исследована неметаллическая фаза в вакуумированной аустенитной нержавеющей стали 08X18H10T и 03X18H10. Приведены данные о составе неметаллических включений в литых пробах металла из сталеразливочного ковша, вакуумирования и разлива на МНЛЗ, а также в пробах холоднокатаного листа толщиной 1,2 мм. Показано, что в пробах стали 08X18H10T из промежуточного ковша МНЛЗ неметаллическая фаза представлена в основном скоплениями нитридов титана, внутри кристаллов которых содержатся оксиды алюминия и титана, а также редкими глобулами небольшого размера в оболочке из оксидов титана. В холоднокатаном листе включения располагаются в основном по всему сечению шлифа и состоят из мелких (5 – 6 мкм) кристаллов нитридов титана. Литые пробы металла аустенитной безтитанистой стали 03X18H10 достаточно чистые по содержанию неметаллических включений. Неметаллическая фаза представлена в основном мелкими включениями алюмокальциевого силиката. В холоднокатаном листе толщиной 1,2 мм неметаллическая фаза представлена крайне редко встречающимися очень мелкими глобулами размером 2 – 3 мкм. Результаты исследования сопоставлены с составом неметаллической фазы невакуумированной стали аналогичных марок на тех же стадиях передела.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, аргоно-кислородное рафинирование, аустенитная нержавеющая сталь, вакуумирование, неметаллические включения, МНЛЗ, холоднокатаный лист, сканирующая электронная микроскопия.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-891-895

В электросталеплавильном цехе № 6 (ЭСЦ-6) ОАО «Челябинский металлургический комбинат» пущен в эксплуатацию камерный вакууматор фирмы «Даниели». Для изучения состава неметаллической фазы на одной из кампаний выплавки нержавеющей стали были отобраны пробы металла до и после обработки металла на вакууматоре, из промежуточного ковша при разливе стали на машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и от холоднокатаного листа аустенитной нержавеющей стали марок 08X18H10T и 03X18H10. Эти результаты сопоставлены с составом неметаллической фазы невакуумированной стали аналогичных марок на тех же стадиях передела [1 – 8].

Исходный металл выплавляли в высокоомощной дуговой электросталеплавильной печи ДСП-100М электросталеплавильного цеха № 6 ОАО «Челябинский металлургический комбинат» (ЧМК). Полупродукт, содержащий около 1,5 % углерода и 18 % хрома, переливали в агрегат аргоно-кислородного рафинирования (АКР), где продували аргоно-кислородной смесью газов до заданного содержания углерода, а затем слива-

ли в сталеразливочный ковш и передавали на агрегат комплексной обработки стали (АКОС). После наводки шлака и подогрева до температуры 1680 – 1685 °С плавки передавали на вакууматор [9 – 12]. Обработку на вакууматоре проводили в течение 59 – 72 мин, в том числе при разрежении менее 3 тор в течение 24 – 30 мин. В конце обработки разрежение в системе составляло 1,04 – 1,10 тор. Металл раскисляли ферросилицием, силикокальцием, а сталь 08X18H10T – еще и титаном ФТи-70 со средним расходом 6,0 кг/т. После доведения металла до заданных химического состава и температуры нержавеющей сталь разливали на МНЛЗ в слябы сечением 170×(1100 ÷ 1350) мм.

Металл опытных плавок содержал 0,73 – 0,79 % Mn, 0,47 – 0,51 % Si, 0,002 – 0,003 % S, 0,026 – 0,028 % P, 17,55 – 17,80 % Cr, 9,04 – 9,06 % Ni. Содержание этих элементов находилось в одних и тех же пределах, но содержания углерода и титана отличались. В стали 08X18H10T содержание углерода составляло 0,046 – 0,054 %, титана – 0,24 – 0,37 %, а в стали 03X18H10 – 0,019 – 0,030 и 0,006 – 0,007 % соответственно.

От двух – трех плавок каждой марки стали отбирали литые пробы металла из сталеразливочного ковша после обработки на АКОС и разлива на МНЛЗ, а также пробы холоднокатаного листа толщиной 1,2 мм.

* Исследование выполнено в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 гг.», контракт № 14.574.21.0054, уникальный идентификатор RFMEFI57414X0054.

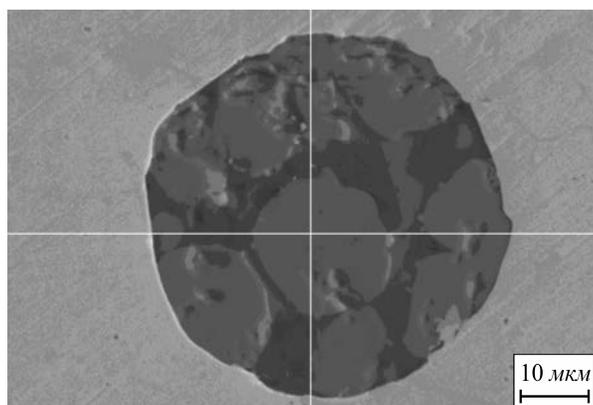
Изучение неметаллических включений проводили в два этапа. На первом этапе на оптическом микроскопе «НЕОРНОТ» производили качественную оценку неметаллических включений и дефектов, определяли и отмечали наиболее часто встречающиеся включения. Второй этап проводили на растровом электронном микроскопе [13 – 14] JEOL JSM-6460LV с энерго-дисперсионным спектрометром фирмы «Oxford Instruments» Южно-Уральского государственного университета.

Аустенитная сталь 08X18H10T

Неметаллические включения в литой пробе металла, взятой из ковша после обработки на АКOC, представляют собой алюмосиликаты кальция размером преимущественно 20 – 25 мкм, изредка 50 – 60 мкм. После вакуумирования и ввода титана в сталь в алюмосиликатах кальция появляются выделения второй фазы из алюмомагниевого шпинели или оксидов титана (рис. 1).

В пробах металла, взятых из промежуточного ковша при разливке стали на МНЛЗ, неметаллическая фаза представлена в основном скоплениями нитридов титана (рис. 2, а) и оксидов алюминия (рис. 2, б), а также редкими глобулами небольшого (примерно 20 мкм) размера в оболочке из оксидов титана (рис. 3). Крупные глобулы в пробах металла с разливки отсутствуют. Они, видимо, успевают удалиться за время вакуумирования и транспортировки ковша на разливку.

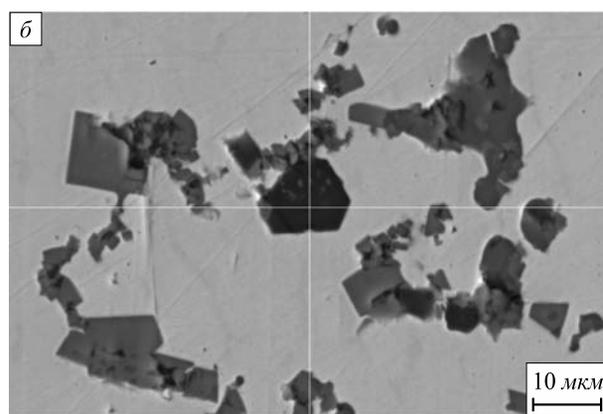
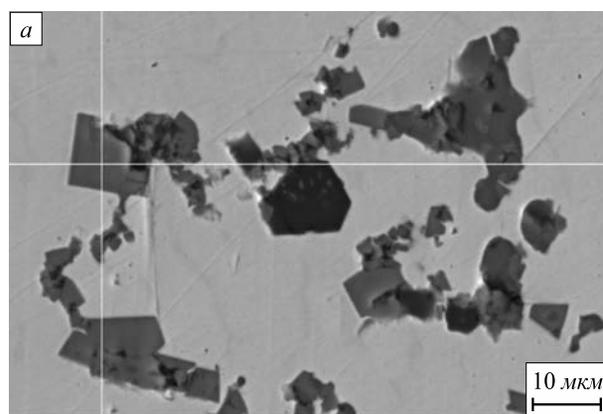
В невакуумированной стали этой марки неметаллические включения в пробах металла с разливки представляют собой крупные (более 100 мкм) глобулы из



Элемент	O	F	Mg	Al	Ca	Ti	Fe	Zr
Содержание, % (по массе)	37,21	3,13	0,48	1,54	27,09	28,58	0,62	1,35

Рис. 1. Выделения второй фазы в крупной глобуле алюмомагниевого шпинели в пробе металла с вакууматора (сталь 08X18H10T)

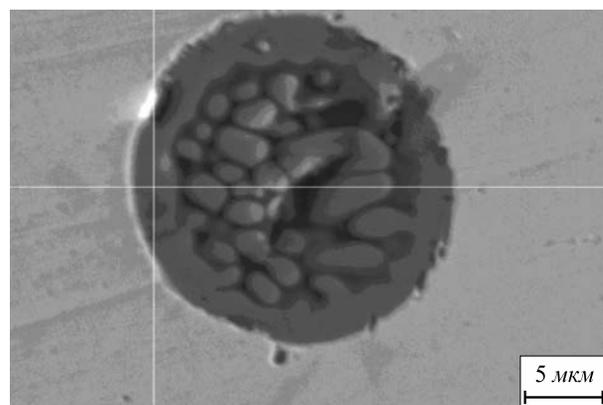
Fig. 1. Second phase selection in a large globule of aluminum-magnesium spinel in the metal sample with vacuum degasser (steel 08Cr18Ni10Ti)



Элемент	O	N	Al	Ti	Ca	Cr	Mg	Mn
Содержание, % (по массе) в пробе а	–	24,41	–	73,79	–	0,70	–	–
Содержание, % (по массе) в пробе б	42,64	–	39,58	9,05	5,70	0,49	1,13	0,44

Рис. 2. Нитрид титана (а) и оксид алюминия (б) в пробе металла с разливки стали 08X18H10T

Fig. 2. Titanium nitride (a) and aluminum oxide (b) in a metal sample with the 08Cr18Ni10Ti steel casting



Элемент	O	Al	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni
Содержание, % (по массе)	27,34	1,89	51,96	6,75	3,44	8,01	0,61

Рис. 3. Неметаллическое включение с оболочкой из оксида титана в пробе металла с разливки стали 08X18H10T

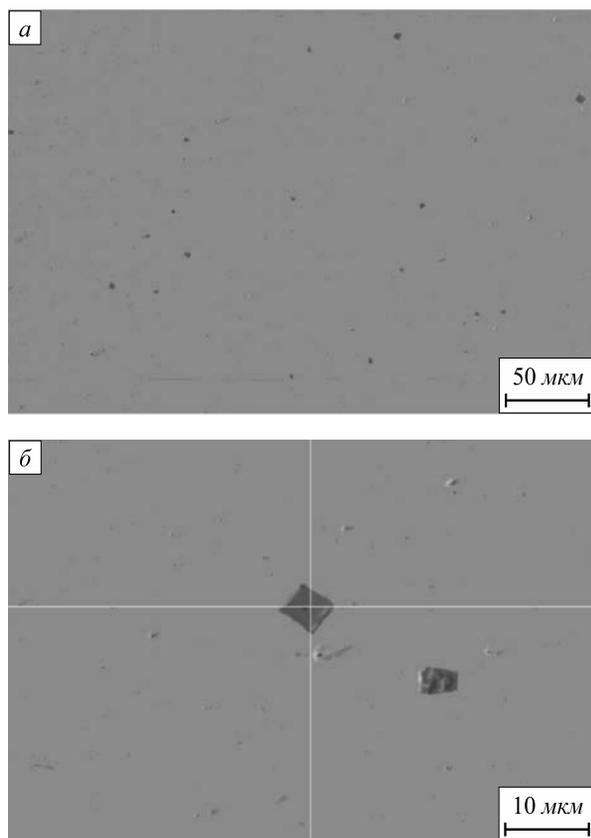
Fig. 3. Nonmetallic inclusions with a blanket from titanium oxide in a metal sample with 08Cr18Ni10Ti steel casting

оксидов титана, хрома, марганца и алюминия с расположенными вокруг кристаллами нитридов титана.

Следует отметить, что по сравнению с невакуумированным металлом [14] в вакуумированной стали 08X18H10T в пробах металла с разливки не встречаются глобулы с вкраплениями кристаллов нитридов и оксидов титана [15]. Вероятно, это является следствием процесса вакуумной обработки, так как такой металл содержит меньшее (0,0011 – 0,0012 %) количество азота.

Холоднокатаный лист вакуумированной стали 08X18H10T достаточно чистый. Строчек неметаллических включений мало. Включения располагаются по всему сечению шлифа (рис. 4, а) и состоят из мелких (5 – 6 мкм) кристаллов нитридов титана (рис. 4, б).

Качественные показатели вакуумированной аустенитной стали значительно выше. Выход высшей марки М2А на опытных плавках составил 59,1 %, М4А – 40,9 % при полном отсутствии брака сталеплавильного происхождения.



Элемент	N	Mg	Al	Ti	Cr	Fe
Содержание, % (по массе)	21,09	0,40	0,68	74,66	1,57	1,60

Рис. 4. Общий вид мелких неметаллических включений (а) и кристалл нитрида титана (б) в образце холоднокатаного листа толщиной 1,2 мм нержавеющей вакуумированной аустенитной стали 08X18H10T

Fig. 4. General view of fine nonmetallic inclusions (a) and titanium nitride crystal (b) in a sample of cold-rolled sheet with a thickness of 1.2 mm of stainless vacuum-degassed austenitic 08Cr18Ni10Ti steel

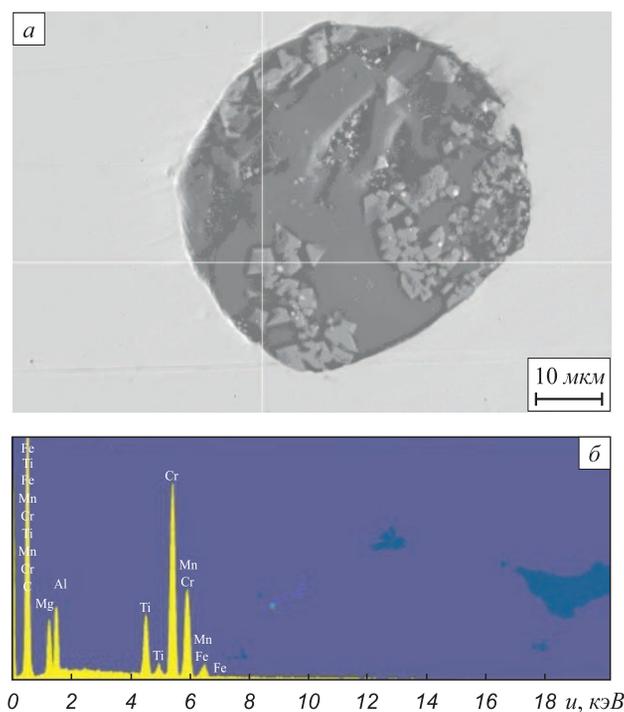
Аустенитная сталь 03X18H10

Неметаллическая фаза в пробах металла с АКЭС представлена мелкими (менее 5 мкм) включениями алюмокальциевого силиката. Аналогичные включения встречаются и в пробах металла перед началом вакуумирования. В конце вакуумирования они укрупняются до 10 мкм (иногда до 40 – 50 мкм), при этом состав неметаллических включений остается прежним.

В пробах металла с разливки состав включений мало чем отличается от ранее описанных: в основном они представлены силикатными глобулами размером 15 – 20 мкм, хотя изредка встречаются и крупные раскристаллизованные глобулярные включения размером 70 – 80 мкм с выделениями кристаллов шпинели (рис. 5).

В целом литые пробы металла аустенитной безтитановой стали достаточно чистые по неметаллическим включениям. Описанные выше включения встречаются не так часто и мало чем отличаются от неметаллических включений в невакуумированном металле.

В холоднокатаном листе толщиной 1,2 мм неметаллическая фаза представлена крайне редко встречающимися очень мелкими (размером 2 – 3 мкм) глобулами, состав которых трудно оценить, так как электронный



Элемент	O	Mg	Al	Ti	Cr	Mn	Fe
Содержание, % (по массе)	36,75	5,03	5,17	6,81	31,15	14,16	0,93

Рис. 5. Выделения кристаллов хромомарганцевой шпинели в силикатном глобуле (а) и их спектр (б) в пробе металла с разливки стали 03X18H10

Fig. 5. Crystal selection of chromium- manganese spinel in a silicate globule (a) and their spectrum (b) in a metal sample with 03Cr18Ni10 steel casting

луч анализатора захватывает площадь примерно 5 мкм, что больше диаметра этого глобуля, и в спектре появляются реплики химического состава стали. Строчки неметаллических включений не обнаружены. В невакуумированной стали 03X18H10 наряду с мелкими глобулями размером 3–5 мкм встречаются небольшие строчки, происходящие, видимо, из раздавленных глобулей алюмосиликата кальция и оксида титана.

Выводы. На растровом электронном микроскопе исследована неметаллическая фаза в литых пробах и пробах листа вакуумированной аустенитной нержавеющей стали 08X18H10Т и 03X18H10. Состав неметаллической фазы в вакуумированной стали 08X18H10Т отличается отсутствием в литом металле двухфазных крупных глобулей с вкраплениями кристаллов нитридов и оксидов титана. В пробах металла, взятых из промежуточного ковша при разливке стали на МНЛЗ, неметаллическая фаза представлена в основном скоплениями нитридов титана, внутри кристаллов которых содержатся оксиды алюминия и титана, а также редкими глобулями небольшого размера в оболочке из оксидов титана. В холоднокатаном листе строчек неметаллических включений немного. Включения располагаются в основном по всему сечению шлифа и состоят из мелких (5–6 мкм) кристаллов нитридов титана. Литые пробы металла аустенитной безтитанистой стали 03X18H10 достаточно чистые по содержанию неметаллических включений. Неметаллическая фаза представлена в основном мелкими включениями алюмокальциевого силиката. В пробах металла с разливки изредка встречаются более крупные раскисленные глобулярные включения с выделениями кристаллов шпинели. В холоднокатаном листе толщиной 1,2 мм строчки неметаллических включений не обнаружены. Неметаллическая фаза представлена крайне редко встречающимися очень мелкими (2–3 мкм) глобулями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Токовой О.К. Аргонкислородное рафинирование нержавеющей стали: монография. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 250 с.
2. Левада А.Г., Антонов В.И., Токовой О.К., Фомченко С.М. Совершенствование технологии производства стали 08-12X18H10Т // *Металлург*. 2008. № 6. С. 43–45.
3. Левада А.Г., Антонов В.И., Токовой О.К., Фомченко С.М. Улучшение технологии производства стали 08-12X18H10Т // *Сталь*. 2008. № 3. С. 40–43.
4. Левада А.Г., Макаров Д.Н., Антонов В.И., Токовой О.К. Улучшение качества листов из коррозионно-стойкой стали без титана // *Сталь*. 2008. № 3. С. 74, 75.
5. Поволоцкий Д.Я., Гудим Ю.А. Производство нержавеющей стали. – Челябинск: изд. ЮУрГУ, 1998. – 236 с.
6. Бородулин Г.М., Мошкевич Е.И. Нержавеющая сталь. – М.: Металлургия, 1973. – 319 с.
7. Бабаков А.А., Приданцев М.В. Коррозионностойкие стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1971. – 320 с.
8. Акшенцева А.П. Металлография коррозионностойких сталей и сплавов. – М.: Металлургия, 1991. – 288 с.
9. Носков Т.В. Аргонкислородное обезуглероживание нержавеющей стали за рубежом // *Обзорная информация института Черметинформация*. 1983. – 24 с.
10. Новик Л.М. Внепечная вакуумная металлургия стали. – М.: Наука, 1986. – 188 с.
11. Кньюпель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Ч. 1. Термодинамические и кинетические закономерности. – М.: Металлургия, 1973. – 312 с.
12. Кньюпель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Ч. 2. Основы и технология ковшовой металлургии. – М.: Металлургия, 1984. – 414 с.
13. Matasuta H., Sato T., Oku M. Chemical State Analysis of Inclusions in IF Steel by EMPA and Auger Electron Spectroscopy // *ISIJ International (Supplement)*. 1996. Vol. 36. P. S125–S127.
14. Токовой О.К., Шабуров Д.В. Исследование неметаллической фазы в аустенитной нержавеющей стали // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2014. № 12. С. 20–23.
15. Nunnington R.C., Sutcliffe N. The steelmaking and casting of Ti stabilized stainless steels. – Present at the 59-th Electric Furnace Conference, Phoenix, Arisona, Nov. 2001. P. 1–39.

Поступила 27 июня 2013 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 12, pp. 891–895.

THE RESEARCH OF NONMETALLIC INCLUSIONS IN VACUUM-DEGASSED AUSTENITIC STAINLESS STEEL BY THE METHOD OF SCANNING ELECTRON MICROSCOPY

O.K. Tokovoi¹, *Dr. Sci. (Eng.), RANS Academician, Professor of the Chair of Physical Chemistry (otok@mail.ru)*

D.V. Shaburov², *Cand. Sci. (Eng.), Head of Technical Department*

¹ **South Ural State University** (76, Lenina ave., Chelyabinsk, 454080, Russia)

² **JSC “Chelyabinsk Metallurgical Plant”** (14, 2-ya Poveletskaya str., Chelyabinsk, 454047, Russia)

Abstract. The non-metallic phases in the two grades 08Cr18Ni10Ti and 03Cr18Ni10 of evacuated austenitic stainless steel have been investigated by scanning electron microscopy and EDX. The data on the composition of nonmetallic inclusions in the metal taken from the ladle, from vacuum treating machine and from CCM, as

well as samples of cold rolled sheet of same metal of 1.2 mm thickness have been presented. It has been shown that in samples of 08Cr18Ni10Ti steel taken from CCM caster tundish, the non-metallic phase consists essentially of titanium nitride clusters, located within the crystals, which contain oxides of aluminum and titanium, as well as rare small globules coated with titanium oxides. The inclusions in cold-rolled sheet are arranged substantially over the entire cross-section and consist of small (5 ... 6 microns) titanium nitride crystals. Cast metal sample of titanium-free austenitic 03Cr18Ni10 steel are clean enough from nonmetallic inclusions. Non-metallic phase is represented mainly by small inclusions of calcium aluminium silicate. In the 1.2 mm thick cold-rolled sheet the non-metallic phase is represented extremely rarely by very small globules of 2...3 micron. Results of the present study have been compared with the known composition of non-metallic phase from non-evacuated similar steel grades at the same stage of processing.

Keywords: electric arc furnace, argon-oxygen refining, austenitic stainless steel, vacuum treatment, non-metallic inclusions, continuous casting machine, cold-rolled sheet, scanning electron microscopy.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-891-895

REFERENCES

1. Tokovoi O.K. *Argonokislородное рафинирование нержавеющих сталей* [Argon-oxygen refining of stainless steel]. Chelyabinsk: Izdatel'skii tsentr YuUrGU, 2015, 250 p. (In Russ.).
2. Levada A.G., Antonov V.I., Tokovoi O.K., Fomchenko S.M. Improvement of production process for 08-12Kh18N10T steel. *Metalurgist*. 2008, vol. 52, no. 5–6, pp. 353–357.
3. Levada A.G., Antonov V.I., Tokovoi O.K., Fomchenko S.M. Production technology improvement of 08-12Cr18Ni10Ti steel. *Stal'*. 2008, no. 3, pp. 40–43. (In Russ.).
4. Levada A.G., Makarov D.N., Antonov V.I., Tokovoi O.K. Improving the quality of titanium-free corrosion-resistant steel sheet. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 3, pp. 249–251.
5. Povolotskii D.Ya., Gudim Yu.A. *Proizvodstvo nerzhaveyushchei stali* [Stainless steel production]. Chelyabinsk: izd. YuUrGU, 1998, 236 p. (In Russ.).
6. Borodulin G.M., Moshkevich E.I. *Nerzhaveyushchaya stal'* [Stainless steel]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 319 p. (In Russ.).
7. Babakov A.A., Pridantsev M.V. *Korroziionostoikie stali i splavy* [Corrosion-resistant steels and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 320 p. (In Russ.).
8. Akshentseva A.P. *Metallografiya korroziionostoikikh stalei i splavov* [Metallography of corrosion-resistant steels and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 288 p. (In Russ.).
9. Noskov T.V. Argon-oxygen decarbonation of stainless steel abroad. *Obzornaya informatsiya instituta Chernetinformatsiya*. 1983, 24 p. (In Russ.).
10. Novik L.M. *Vnepechnaya vakuumnaya metallurgiya stali* [Out-of-furnace steel vacuum metallurgy стали]. Moscow: Nauka, 1986, 188 p. (In Russ.).
11. Knüppel Helmut. *Desoxydation und Vakuumbehandlung von Stahlschmelzen. Bd. 1. Thermodynamische und kinetische Grundlagen*. Düsseldorf: Verl. Stahleisen, 1970. 310 S. (Russ.ed.: Knüppel H. *Raskislenie i vakuumnaya obrabotka stali. Ch. I. Termodinamicheskie i kineticheskie zakonomernosti*. Moscow: Metallurgiya, 1973. 311 p.).
12. Knüppel Helmut. *Desoxydation und Vakuumbehandlung von Stahlschmelzen. Bd. 2. Grundlagen und Verfahren der Pfannenmetallurgie*. Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 1983. (Russ.ed.: Knüppel H. *Raskislenie i vakuumnaya obrabotka stali. Ch. II. Osnovy i tekhnologiya kovshovoi metallurgii*. Moscow: Metallurgiya, 1984. 414 p.).
13. Matasuta H., Sato T., Oku M. Chemical State Analysis of Inclusions in IF Steel by EMPA and Auger Electron Spectroscopy. *ISIJ International (Supplement)*. 1996, vol. 36, pp. 125–127.
14. Tokovoi O.K., Shaburov D.V. Study of nonmetallic phase in austenitic stainless steel. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 12, pp. 20–23. (In Russ.).
15. Nunnington R.C., Sutcliffe N. The steelmaking and casting of Ti stabilized stainless steels. *Present at the 59-th Electric Furnace Conference, Phoenix, Arisona*, Nov. 2001, pp. 1–39.

Acknowledgements. The research was fulfilled within the frameworks of the realization FCP “Research and development by the priority directions of the development of scientific-technological complex in Russia for 2014 – 2020”, contract no. 14.574.21.0054, unique identifier RFMEFI57414X0054.

Received June 27, 2013

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ВИХРЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ОГНЕУПОРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ФУТЕРОВКУ КОНВЕРТЕРОВ. СООБЩЕНИЕ 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ КАПЕЛЬ ШЛАКА*

*Калиногорский А.Н.¹, аспирант кафедры металлургии черных металлов
Протопопов Е.В.¹, д.т.н., профессор, ректор (protopopov@sibsiu.ru)
Чернятевич А.Г.², д.т.н., профессор, заведующий отделом физико-технических
проблем металлургии стали
Фейлер С.В.¹, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой металлургии черных металлов
Багрянцев В.И.¹, к.т.н., заведующий экспериментальной лабораторией
автоматизированных энергогенерирующих технологий*

¹ Сибирский государственный индустриальный университет
(654007, Россия, г. Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, 42)
² Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины
(49050, Украина, г. Днепрпетровск, пл. академика Стародубова, 1)

Аннотация. Выполнено исследование особенностей применения вихревых газовых струй для повышения эффективности нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров. С использованием численного моделирования рассмотрена аэродинамическая картина в рабочем пространстве агрегата и особенности движения капель конвертерного шлака при подаче нейтрального газа через специальную фурму с элементами вихревого аппарата. Уточнены закономерности движения капель шлака различного размера к футеровке конвертера, определена зависимость между параметрами движения капель шлака и характеристиками вихревой струи. Установлено, что траектория движения капель шлака независимо от их размера определяется в основном степенью закрутки вихревой струи. Показана принципиальная возможность повышения технологической гибкости процесса нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертеров при использовании вихревых газовых струй.

Ключевые слова: конвертер, вихревая струя, аэродинамика, шлак, раздувка, размер капель, траектория, огнеупорное покрытие.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-896-900

Дополнительная информация по аэродинамике газожидкостных потоков и гидродинамике жидкого шлака в агрегате позволяет более эффективно реализовывать новые технологические разработки по нанесению огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров [1 – 6].

В работе [6] по диспергированию жидкого шлака направленными газовыми струями показано, что минимальный размер капли жидкого шлака составляет 300 мкм и лишь в отдельных случаях может уменьшиться до 100 мкм. После отделения капли от основного объема шлака она разгоняется потоком газа; в дальнейшем ее движение определяется главным образом размером, а также параметрами подаваемого нейтрального газа.

Мелкие капли шлака быстро достигают скорости потока транспортирующего газа, двигаются вместе с ним и частично восходящими потоками выносятся из конвертера в газоотводящий тракт [7 – 11]. Более крупные капли также разгоняются потоком газа и в дальнейшем двигаются как по инерции, так и под влиянием аэродинамики по-

тока. При получении импульса наиболее крупные капли двигаются по инерции, достигая футеровки конвертера, при этом испытывая только сопротивление среды. Так как для условий раздувки шлака в кислородном конвертере характерно турбулентное течение газов, то математическое описание параметров обтекания капель шлака газом выполняли в соответствии с законом Ньютона [9].

Рассмотрим движение капли шлака по траектории из зоны диспергирования к футеровке для условий рабочего пространства конвертера. Поток транспортирующего газа, несущий капли шлака, двигается преимущественно вверх по спирали. Тогда траектория движения капель описывается системой уравнений [12]:

$$\begin{aligned} \frac{dW_\phi}{dt} &= \frac{W_r W_\phi}{r} - \frac{(W_\phi - V_\phi) V_S}{L}; \\ \frac{dW_r}{dt} &= \frac{W_\phi^2}{r} - \frac{(W_r - V_r) V_S}{L}; \\ \frac{dW_z}{dt} &= - \frac{(W_z - V_z) V_S}{L}, \end{aligned}$$

* Работа выполнена в СибГИУ по государственному заданию Минобрнауки России (проект 2556).

где W_φ, W_r, W_z и V_φ, V_r, V_z – тангенциальная, радиальная и вертикальная составляющие скорости капли шлака и газового потока соответственно; V_s – относительная скорость обтекания капли шлака потоком газа; L – характерное расстояние, на котором капля шлака разгоняется потоком транспортирующего газа.

Таким образом, основными параметрами, определяющими движение капли, будет скорость, которую капля приобрела при вылете из зоны диспергирования, а также характерное расстояние L .

В такой постановке значение L определяется соотношением [13]

$$L = \frac{4 \rho_{\text{ш}} d}{3\rho C_f},$$

где $\rho_{\text{ш}}$ – плотность шлака; ρ – плотность азота при температуре раздувки шлака; d – диаметр капли шлака; C_f – коэффициент сопротивления.

При турбулентном течении газа ($Re \geq 500$) коэффициент сопротивления будет равен 0,44.

Уравнение движения капли шлака в простейшей форме в безразмерном виде можно записать следующим образом [12]:

$$dW/dt = -W^2,$$

где W – скорость капли шлака в безразмерном виде.

При начальном условии $t = 0, W = 1$ решение можно записать в следующем виде [12]:

$$W = (t + 1)^{-1},$$

где t – время в безразмерном виде.

Расчетные значения радиальной составляющей скорости капли после ее отрыва от основного объема шла-

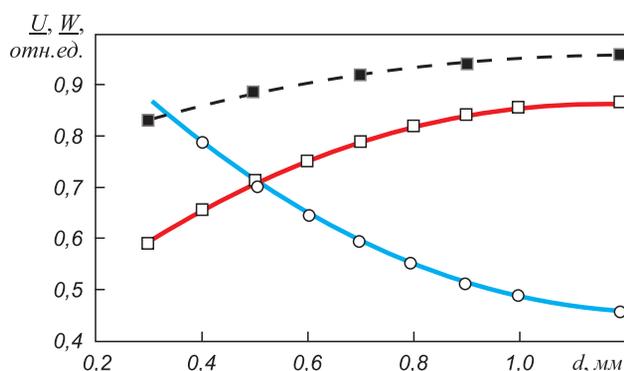


Рис. 1. Зависимость скорости капли от ее диаметра:

1 – радиальная безразмерная скорость капли после отрыва от основного объема шлака; 2 и 3 – безразмерная скорость капли у футеровки конвертера при нормальных условиях и при температуре 600 °С

Fig. 1. Dependence of drop velocity on its diameter:

1 – radial dimensionless speed of the drop after its tearing off from the main volume of the slag; 2 and 3 – dimensionless speed of the drop near the converter lining at the normal conditions and the temperature of 600 °С

ка и полной безразмерной скорости капли вблизи футеровки конвертера представлены на рис. 1. Радиальную скорость капли шлака (U) рассчитывали относительно радиальной скорости вихревой струи, а безразмерную скорость (W) – относительно максимальной скорости капель шлака при их разгоне.

Струя подаваемого на раздувку шлака азота, истекая из сопла фурмы, имеет относительно низкую температуру, однако быстро подвергается нагреву, распространяясь в высокотемпературных условиях рабочего пространства конвертера. Как видно (рис. 1), безразмерная скорость движения капель различного размера на выходе из зоны диспергирования (разбрызгивания) при взаимодействии с газовой струей и вблизи футеровки конвертера отличаются незначительно. В такой постановке задачи базовые расчеты выполнены для нормальных условий (т.е. для холодного газа в конвертере), а основные расчеты выполнены для условий при разогреве транспортирующего газа до 600 °С. Даже для частиц диам. 0,3 мм относительная скорость на стенке равна 0,83. Для частицы диам. 1,0 – 1,2 мм погрешность составляет 4 – 6 %. Можно ожидать, что скорость капли при ее движении в высокотемпературной среде в объеме конвертера изменится незначительно.

На разгон капли шлака высокоскоростным потоком транспортирующего газа значительное влияние оказывает размер этой капли. На рис. 1 показана радиальная скорость капель различного диаметра относительно радиальной скорости потока транспортирующего газа. Крупные частицы шлака приобретают меньшую скорость, поэтому они будут подниматься на меньшую высоту при нанесении на футеровку по сравнению с мелкими каплями вследствие своей большей инерции при взаимодействии с потоком газа.

Результаты расчета траектории движения капель шлака диам. 0,3 – 1,2 мм на участке разгона потоком нейтрального газа представлены на рис. 2 (по оси ординат – относительная безразмерная высота (z), на которую поднимется образовавшаяся капля при

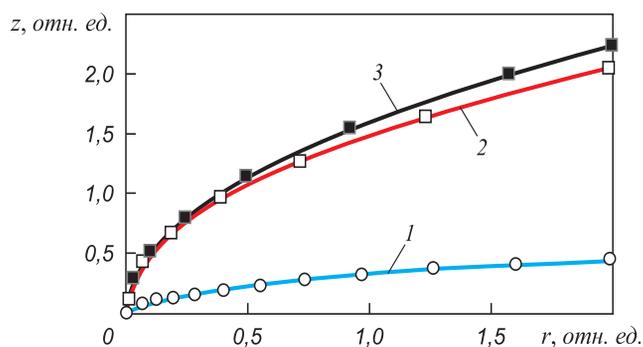


Рис. 2. Траектории движения капли шлака диаметра 1,2 мм (■), 0,3 мм (□) и 0,3 - 1,2 мм (○) на участке ее разгона

Fig. 2. Trajectories of the slag drops with diameter of 1.2 mm (■), 0.3 mm (□) and 0.3 - 1.2 mm (○) in a area of their acceleration

разбрызгивании шлака, по оси абсцисс – относительное безразмерное расстояние (r), на которое удаляется капля шлака от зоны диспергирования). Данные приведены для вихревых струй газа с умеренной ($\sigma = 1$) и с сильной ($\sigma = 0,2$) закруткой (где σ – отношение незакрученной и закрученной составляющих скорости потока). Этот диапазон охватывает практически все возможные варианты раздувки шлака с использованием вихревой фурмы. Как видно (рис. 2), степень закрутки струи оказывает определяющее влияние на траекторию движения капель шлака. Формирование струи с сильной закруткой позволяет эффективно ошлаковывать нижние горизонты футеровки конвертера, использование слабо закрученных струй позволяет направлять брызговынос капель шлака на верхние горизонты огнеупорной кладки агрегата. Результаты расчета для капель различного размера имеют близкие значения, что обусловлено безразмерной постановкой задачи.

С целью оценки влияния структуры потока транспортирующего газа на поведение капель шлака проводили расчет величины относительного безразмерного числа Рейнольдса для условий обтекания капель различного диаметра потоком газа (рис. 3). Число Рейнольдса определяли из разницы полных относительных скоростей капли и потока газа [14]

$$V_s = [(V_\phi - W_\phi)^2 + (V_r - W_r)^2 + (V_z - W_z)^2]^{1/2}.$$

Таким образом, безразмерное число Рейнольдса имеет вид

$$\frac{Re}{Re_0} = \left\{ \frac{1}{r^2} + \left[\frac{P^2 \tau^3}{3} - \left(1 - \frac{1}{r^2} \right)^{1/2} \right]^2 + (\sigma - z^{(1)})^2 \right\}^{1/2},$$

где P – давление среды.

Так как $(\sigma - z^{(1)})^2 = \sigma^2 \exp(-2P\tau)$, то окончательно [15] получим

$$\frac{Re}{Re_0} = \left\{ \frac{1}{r^2} + \left[\frac{P^2 \tau^3}{3} - \left(1 - \frac{1}{r^2} \right)^{1/2} \right]^2 + \sigma^2 \exp(-2P\tau) \right\}^{1/2}.$$

Анализ зависимости уменьшения относительного числа Рейнольдса (Re/Re_0) с увеличением относительного безразмерного расстояния (r), на которое удаляется капля шлака при разбрызгивании, позволяет определить, что при движении капли ее скорость постепенно выравнивается со скоростью потока транспортирующего газа. С уменьшением диаметра капль также происходит закономерное уменьшение значения Re/Re_0 , таким образом скорость движения мелких капль незначительно отличается от скорости движения окружающего ее газа. Капли небольшого диаметра фактически витают в потоке транспортирующего газа, в то же время крупные капли шлака не испытывают такого сильного влияния со стороны потока закрученного газа и продолжают двигаться по инерции к футеровке конвертера.

Выводы. Проанализированы особенности движения капель шлака, образующихся при разбрызгивании расплава вихревыми газовыми струями в кислородном конвертере. Определена зависимость между параметрами движения брызг шлака различного диаметра и характеристиками вихревой струи. Установлено, что на параметры движения мелких капль шлака большое влияние оказывает аэродинамика транспортирующего газа, а поведение крупных капль шлака только в начале движения зависит от скорости газового потока, в дальнейшем его влияние становится незначительным. При этом траектория движения капль шлака независимо от размера определяется степенью закрутки вихревой струи нейтрального газа. Таким образом, применение вихревых газовых струй может в значительной степени повысить эффективность процесса нанесения огнеупорного покрытия на футеровку кислородных конвертеров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соколов В.В., Протопопов Е.В., Шакиров К.М. Анализ оптимальных параметров дутьевого режима операции нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера // Изв. вуз. Черная металлургия. 2004. № 6. С. 18 – 21.
2. Kumar D.S., Prasad G., Vishwanath S.C., Ghorui P.K., Mazumdar D., Ranjan M., Lal P.N. Converter life enhancement through optimization of operating practices // Iron and Steelmaker. 2007. № 6. P. 521 – 528.
3. Шерemet В.А., Кекух А.В., Троший С.В., Стовпченко А.П., Бродский А.С., Павлюченков О.И. Опыт эксплуатации и комплексная технология ухода за футеровкой конвертера // Новые огнеупоры. 2006. № 1. С. 4 – 7.
4. Stone R.P., Neith D., Koester S., Patterson D., Branion R. Further process improvements at Severstal Sparrows Point via new technology implementation // AIS Tech 2009 Proceedings. 2009. № 1. P. 737 – 747.
5. Бойченко Б.М., Охотский В.Б., Харлашин П.С. Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали,

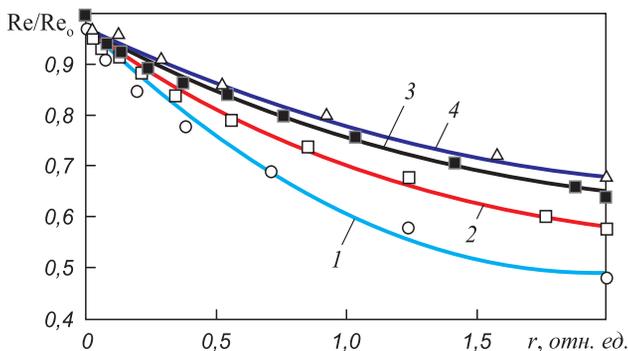


Рис. 3. Относительное число Рейнольдса на участке разгона капли шлака при различном диаметре капли, мм:
1 – 0,3; 2 – 0,6; 3 – 0,9; 4 – 1,2

Fig. 3. Relative Reynolds number upon the area of slag drop acceleration with different diameter drops at mm:
1 – 0.3; 2 – 0.6; 3 – 0.9; 4 – 1.2

- конструкция агрегатов, рециркуляция материалов и экология. – Днепропетровск: РВА «Дніпро – ВАЛ», 2006. – 454 с.
6. Калиногорский А.Н., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Фейлер С.В., Багрянцев В.И. Исследование особенностей применения вихревых технологий для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров. Сообщение 1. Особенности дробления жидкого шлака при раздувке вихревой фурмой // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 10. С. 756 – 760.
 7. Степанова А.А., Захаров И.М., Чигасов Д.Н., Шатохин И.М. // Результаты опробования продувки металла в 370-т кислородном конвертере семисопловой фурмой с центральным соплом // Черная металлургия. Бюллетень НТИ. 2007. № 1. С. 20 – 22.
 8. Пентайков С.П. Современная конструкция фурменной головки и рациональные технологические режимы ее использования // Черная металлургия. Бюллетень НТИ. 2001. № 10. С. 30 – 33.
 9. Харлашин П.С., Ковура А.Б., Куземко Р.Д. Модель расчета термодинамических параметров струи в конвертере // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2010. № 7. С. 97 – 100.
 10. Соколов В.В., Протопопов Е.В., Шакиров К.М. Аналитические исследования процессов нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертеров. Теория подобия // Изв. вуз. Черная металлургия. 2004. № 6. С. 12 – 15.
 11. Тахаудинов Р.С., Буданов Б.А., Столяров А.М. Исследование процесса нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера // Изв. вуз. Черная металлургия. 2001. № 8. С. 26 – 28.
 12. Гольдштик М.А. Вихревые потоки. – Новосибирск: Наука, 1981. – 367 с.
 13. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. – М.: Мир, 1987. – 588 с.
 14. Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И. Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках. – Новосибирск: АН СССР, 1987. – 282 с.
 15. Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1987. – 301 с.

Поступила 28 октября 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 12, pp. 896–900.

APPLICATION OF VORTEX TECHNOLOGIES OF REFRACTORY COATING FORMATION FOR CONVERTER LINING. REPORT 2. FEATURES AND MOVEMENT PARAMETERS OF SLAG DROPS

A.N. Kalinogorskii¹, *Postgraduate of the Chair of Ferrous Metallurgy*

E.V. Protopopov¹, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector*
(protopopov@sibsio.ru)

A.G. Chernyatevich², *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Physical and Technical Problems in Steel Metallurgy*

S.V. Feiler¹, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair of Ferrous Metallurgy*

V.I. Bagryantsev¹, *Cand. Sci. (Eng.), Head of the Experimental Laboratory of Automated Energy Generating Technologies*

¹ **Siberian State Industrial University** (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

² **Institute of Ferrous Metallurgy named after Nekrasov Z.I., Ukrainian National Academy** (1, Ak. Starodubova sq., Dnepropetrovsk, 49050, Ukraine)

Abstract. The paper is devoted to the research of application of vortex technologies of the gas jets to increase the efficiency of fire-resistant coatings on the converter lining. Using numerical simulation, the authors considered the aerodynamic pattern in the working space of the unit and the features of the converter slag drop motion when supplying neutral gas through a special lance with the elements of the vortex device. The laws of slag drop motions of different size to the converter lining have been refined, as well as the dependence among the parameters of slag drop movement and the characteristics of the vortex jet has been defined. It has been established that the trajectory of the slag drops, regardless of their size is mainly determined by the degree of twist of the vortex jet. The article also shows the principal possibility of increasing the technological flexibility of the slag skull application process on the lining converter when using vortex gas jets.

Keywords: converter, vortex jet, aerodynamics, slag, blowing, drop dimension, trajectory, refractory coat.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-896-900

REFERENCES

1. Sokolov V.V., Protopopov E.V., Shakirov K.M. Analysis of optimal parameters of a blow mode when coating of slag scull on a converter lining. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2004, no. 6, pp. 18–21. (In Russ.).
2. Kumar D. S., Prasad G., Vishwanath S. C., Ghorui P. K., Mazumdar D., Ranjan M., Lal P. N. Converter life enhancement through optimization of operating practices. *Iron and Steelmaker*. 2007, no. 6, pp. 521–528.
3. Sheremet V.A., Kekukh A.V., Troshchii S.V., Stovpchenko A.P., Brodskii A.S., Pavlyuchenkov O.I. Operating experience and complex technology maintenance of a converter lining. *Novye ognepupory*. 2006, no. 1, pp. 4–7. (In Russ.).
4. Stone R.P., Neith D., Koester S., Patterson D., Branion R. Further process improvements at Severstal Sparrows Point via new technology implementation. *AIS Tech 2009 Proceedings*. 2009, no. 1, pp. 737–747.
5. Boichenko B.M., Okhotskii V.B., Kharlashin P.S. *Konvertornoe proizvodstvo stali: teoriya, tekhnologiya, kachestvo stali, konstruktivnaya agregatov, retsirkulyatsiya materialov i ekologiya* [Converter steel production: theory, technology, steel quality, unit construction, material recirculation and ecology]. Dnepropetrovsk: RVA “Dnipro – VAL”, 2006, 454 p. (In Russ.).
6. Kalinogorskii A.N., Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Feiler S.V., Bagryantsev V.I. Application of vortex technologies of refractory coating formation for converter lining. Report 1. Features of liquid slag crushing at blowing by vortex tuyere. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 10, pp. 756–760. (In Russ.).
7. Stepanova A.A., Zakharov I.M., Chigasov D.N., Shatokhin I.M. Testing data of metal blowing in a 370-tonne oxygen converter with a seven-nozzle lance with a central nozzle. *Chernaya metallurgiya: Byul. NTI*. 2007, no. 1, pp. 20–22. (In Russ.).
8. Pentaikov S.P. Modern construction of a tuyere end and rational technological modes of its usage. *Chernaya metallurgiya: Byul. NTI*. 2001, no. 10, pp. 30–33. (In Russ.).
9. Kharlashin P.S., Kovura A.B., Kuzemko R.D. Calculation model of thermodynamic parameters of a jet in a converter. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2010, no. 7, pp. 97–100. (In Russ.).

10. Sokolov V.V., Protopopov E.V., Shakirov K.M. Analytical research of the processes of slag skull application on Converter lining. The theory of similarity. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2004, no. 6, pp. 12–15. (In Russ.).
11. Takhautdinov R.S., Budanov B.A., Stolyarov A.M. Research of the process of slag skull coating on a converter lining. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2001, no. 8, pp. 26–28. (In Russ.).
12. Gol'dshtik M.A. *Vikhreyye potoki* [Vortex flow]. Novosibirsk: Nauka, 1981, 367 p. (In Russ.).
13. Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N. *Swirl flows*. Abacus Press, England, 1984, 475 p. (Russ.ed.: Gupta A., Lilley D., Syred N. *Zakruchennyye potoki*. Moscow: Mir, 1987, 588 p.).
14. Kutateladze S.S., Volchkov E.P., Terekhov V.I. *Aerodinamika i teploobmen v ogranichennykh vikhrevykh potokakh* [Aerodynamics and heat-mass exchange in limited vortex flows]. Novosibirsk: AN SSSR, 1987, 282 p. (In Russ.).
15. Kutateladze S.S., Nakoryakov V.E. *Teplmassoobmen i volny v gazozhidkostnykh sistemakh* [Heat-mass exchange and waves in gas-liquid systems]. Novosibirsk: Nauka. Sibirskoe otdelenie, 1987, 301 p. (In Russ.).

Acknowledgements. The work was fulfilled in SibSIU by the state task of Russian Ministry of Education and Science (project 2556).

Received October 28, 2015

УДК 669.046: 662.74:628.56

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ОТ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА

Павлович Л.Б., д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики и экологии

Коротков С.Г., к.т.н., доцент, зав. кафедрой теплоэнергетики и экологии

Осокина А.А., аспирант кафедры теплоэнергетики и экологии (osokina.alina@inbox.ru)

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

Аннотация. Проведена оценка экологического риска от загрязнения атмосферного воздуха производственной деятельностью металлургического предприятия ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» от всех организованных и неорганизованных источников выбросов цехов: рудоподготовки, агломерации, доменного, сталеплавильного, прокатного, литейного. Неканцерогенный экологический риск хронической интоксикации, не превышающий приемлемый уровень, составлял 75 % от всех организованных источников выбросов (208 шт.), высокий риск – 22,1 %, очень высокий – 2,9 %. Неканцерогенный риск от всех неорганизованных источников выбросов (39 шт.) имел превышение предельно допустимого уровня в 40 раз. Для снижения организованных выбросов предлагается в цехах рудоподготовки, агломерации и доменном увеличении высоты дымовых труб, в сталеплавильном, прокатном и литейном – регулирование геометрических параметров горловины трубы Вентури и СИОТа. Предложенные рекомендации по технологическим приемам малозатратны и позволяют снизить содержание в воздухе рабочей зоны вредных веществ и приблизиться к достижению оптимальных условий труда (первый класс).

Ключевые слова: организованные, неорганизованные источники выбросов; неканцерогенные, канцерогенные вещества; экологический риск, агломерационное, доменное, сталеплавильное, прокатное, литейное производства.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-901-905

В связи с вступлением в ВТО, где контроль окружающей среды осуществляется согласно стандартам ISO 14000 с использованием экологического менеджмента, техносферная безопасность определяется рисками, вследствие чего появляется необходимость в их расчете. Риск – это мера опасности. Риски классифицируются как индивидуальный, технический, экологический, социальный, экономический и др. Экологический риск выражает вероятность экологического бедствия, катастрофы, нарушение дальнейшего нормального функционирования, существования экологических систем и объектов в результате антропогенного вмешательства в природную среду или стихийного бедствия. Источником экологического риска наряду с вышеприведенными причинами также может быть техногенное воздействие – загрязнение отходами производства водоемов, почвы и атмосферного воздуха [1 – 4]. Экологический риск может иметь количественное выражение. Для нормирования загрязнений окружающей среды с целью практически полной защиты здоровья человека от загрязнений предлагается внедрение концепции риска, которая лежит в основе государственной политики США 80-х гг. прошлого века [5, 6].

Целесообразность расчета состоит в том, что в России, согласно установленным санитарным нормам проектирования промышленных предприятий (СН 369 – 74), при расчете высоты дымовой трубы максимальная приземная концентрация (C_{\max}) должна быть не более

предельно допустимой максимально разовой ($ПДК_{\text{м.р}}$). Но, сравнивая эти величины, значения C_{\max} всегда будет меньше $ПДК_{\text{м.р}}$, так как среднесуточная $ПДК_{\text{с.с}}$, которая лежит в основе расчета C_{\max} , в несколько раз меньше $ПДК_{\text{м.р}}$, что значительно занижает расчетную высоту дымовой трубы. Как известно, показатель $ПДК_{\text{м.р}}$ нигде в мире не используется. При расчете рисков по международной системе, где используется параметр $ПДК_{\text{с.с}}$, получается более объективная оценка содержания вредных веществ в воздухе рабочей зоны.

Целью настоящей работы является изучение экологических рисков организованных и неорганизованных источников выбросов от производственной деятельности металлургического производства.

Оценка риска для здоровья человека проводилась в два этапа согласно документу «Руководство по оценке профессионального риска для здоровья работников. Организационно-методические основы, принципы и критерии оценки» (Р 2.2.1766 – 63) по следующему алгоритму, приведенному в работе [7]. На первом этапе выполнен расчет максимальных приземных концентраций C_{\max} согласно методике расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий [8] с использованием отчетной формы 2ТП-воздух (2011 г.) [9]. На втором этапе проводился непосредственно расчет экологических рисков. Далее сравнивали полученные результаты с установленными [10 – 12] приемлемыми значениями риска:

для неканцерогенных веществ 0,02, для канцерогенных веществ $1 \cdot 10^{-3}$.

Аглоизвестковое производство включает в себя цехи рудоподготовки и агломерации. В их составе насчитывается 71 источник организованных выбросов (18 труб) загрязняющих веществ: неканцерогенных – оксиды железа и кальция, пыль агломерата и кремнезема, оксид углерода, диоксид серы, оксид и диоксид азота, а также коксовая пыль; канцерогенных – бенз[а]пирен. Расчеты показали, что из 31 источника в цехе рудоподготовки 20 (64,5 %) имели неканцерогенный экологический риск, не превышающий допустимый уровень. Экологический риск составлял 0,0007 – 0,012 при высоте дымовой трубы 18 – 30 м. Для 11 источников (вагоноопрокидыватель, корпуса распределения материалов) наблюдалось превышение приемлемого риска в 5,2 и 1,3 раза. Высота дымовых труб этих источников выбросов составляет 5 – 22 м. Суммарный риск по цеху от организованных источников выбросов за счет превышения приемлемого риска по двум источникам составлял 0,17 (17 %). Превышения по канцерогенному веществу – бенз[а]пирену – выявлено не было. Неканцерогенный экологический риск хронической интоксикации, не превышающий приемлемый уровень, составлял 64,5 % от всех организованных источников выбросов, высокий риск – 25,8 %, очень высокий – 9,7 %. Рекомендуется увеличить высоту труб на вагоноопрокидывателе до 15 м и на корпусе распределения материалов до 30 м. В этом случае по расчетам экологический риск не будет превышать допустимый уровень по цеху [13].

В цехе агломерации 13 источников (32,5 %) показали превышение экологического риска в 1,8 – 5,4 раза. Высота дымовых труб этих источников выбросов составляет 15 – 120 м. Остальные 27 источников не имели превышения по неканцерогенному экологическому риску. Суммарный риск по цеху составлял 0,26 и имел превышение в 13 раз. Превышения по канцерогенному веществу бенз[а]пирену выявлено не было. Неканцерогенный экологический риск хронической интоксикации, не превышающий приемлемый уровень, составлял 67,5 % от всех организованных источников выбросов, высокий риск – 27,5 %, очень высокий – 5 %. Рекомендуется увеличить высоту труб на агломашине № 1 – 3 в зоне спекания до 125 м, в корпусе первичного смешивания – до 20 м и перегрузочных узлах 11, 12, 13 – до 25 м. В этом случае по расчетам экологический риск не будет превышать допустимый уровень по цеху [14].

Доменный цех насчитывает 33 источника организованных выбросов (12 труб). Выбросы загрязняющих веществ: неканцерогенные – оксиды железа, марганца, магния, кальция, углерода, алюминия, коксоагломерационная пыль, пыль кремнезема, сероводород, диоксид серы, оксид и диоксид азота; канцерогенные – бенз[а]пирен. Расчеты показали, что 14 источников (42,4 %) имели

превышение приемлемого уровня риска в 1,6 – 2,45 раз. Экологический риск составлял 0,032 – 0,049 при высоте дымовой трубы 8 – 23 м. Остальные 18 источников не имели превышения по неканцерогенному экологическому риску ($Risk_{\text{нkc}}$). Суммарный риск по цеху составлял 0,16. Превышения по канцерогенному веществу бенз[а]пирену выявлено не было. Неканцерогенный экологический риск хронической интоксикации, не превышающий приемлемый уровень, составлял 57,6 % от всех организованных источников выбросов, высокий риск – 42,4 %. Рекомендуется увеличить высоту труб на перегрузочных станциях 1 – 2, конвейерах АС-1, 2, 6, 7 и в аварийном приемном устройстве № 3 АС-1-2 до 15 м. В этом случае по расчетам экологический риск не будет превышать допустимый уровень по цеху.

Сталеплавильное производство насчитывает 42 источника организованных выбросов (17 труб). Выбросы загрязняющих веществ: неканцерогенные – оксиды железа, марганца, магния, кальция, углерода, алюминия, цинка, фтористый водород, пыль кремнезема, диоксид серы, оксид и диоксид азота; канцерогенные – бенз[а]пирен. Расчеты показали, что 11 источников (26 %) имели превышение приемлемого уровня риска в 2,6 – 2,8 раз. Экологический риск составлял 0,051 – 0,056. Остальные 31 источник не имели превышения по неканцерогенному экологическому риску. Суммарный риск по цеху составлял 0,17. Превышения по канцерогенному веществу бенз[а]пирену выявлено не было. Неканцерогенный экологический риск хронической интоксикации, не превышающий приемлемый уровень, составлял 74 % от всех организованных источников выбросов, высокий риск – 26 %. Рекомендуется провести регулирование сечения горловины трубы Вентури, которая стоит на очистке источников, превышающих приемлемый уровень риска, что позволит достичь максимальной эффективности работы очистного сооружения. В этом случае по расчетам экологический риск не будет превышать допустимый уровень по сталеплавильному производству.

Прокатное производство насчитывает 14 источников организованных выбросов (6 труб). Выбросы загрязняющих веществ: неканцерогенные – оксиды железа и углерода, пыль кремнезема, диоксид серы, оксид и диоксид азота; канцерогенные – бенз[а]пирен. Расчеты показали, что всего 1 источник имел превышение приемлемого уровня риска в 1,3 раза. Экологический риск составлял 0,026. Остальные 13 источников не имели превышения по неканцерогенному экологическому риску. Суммарный риск по цеху составлял 0,041. Превышения по канцерогенному веществу бенз[а]пирену выявлено не было. Неканцерогенный экологический риск хронической интоксикации, не превышающий приемлемый уровень, составлял 92,9 % от всех организованных источников выбросов, высокий риск – 7,1 %. Рекомендуется провести регулирование сечения горловины трубы Вентури, которая стоит на очистке источ-

ника, превышающего приемлемый уровень риска, что позволит достичь максимальной эффективности работы очистного сооружения. В этом случае по расчетам экологический риск не будет превышать допустимый уровень по прокатному производству.

Литейный цех насчитывает 48 источников организованных выбросов (8 труб). Выбросы загрязняющих веществ: неканцерогенные – оксиды железа и углерода, пыль древесная, диоксид серы, оксид и диоксид азота; цианистый и фтористый водород. Расчеты показали, что всего 2 источника имели превышение приемлемого уровня риска в 2,6 – 6,5 раз. Экологический риск составлял 0,051 – 0,13. Остальные 46 источников не имели превышения по неканцерогенному экологическому риску. Суммарный риск по цеху составлял 0,21. Неканцерогенный экологический риск хронической интоксикации, не превышающий приемлемый уровень, составлял 95,8 % от всех организованных источников выбросов, высокий риск – 2,1 %, очень высокий – 2,1 %. Рекомендуется провести регулирование сечения горловины трубы Вентури и СИОТа, которые стоят на очистке источников, превышающих приемлемый уровень риска. В этом случае эффективность их работы станет максимальной, по расчетам экологический риск не будет превышать допустимый уровень по литейному цеху.

Металлургическое предприятие имеет 208 источников организованных выбросов. Риск по цехам составлял 0,041 – 0,26, превышение в 2,1 – 13,0 раз. Превышения по канцерогенному веществу бенз[а]пирену выявлено не было. Риски можно ранжировать следующим образом: неканцерогенный экологический риск, не превышающий приемлемый уровень, составлял 75 % от всех организованных источников выбросов, высокий риск –

22,1 %, очень высокий – 2,9 %. Превышение в процентном соотношении по металлургическому производству для организованных источников выбросов невысокое, если сравнивать с коксохимическим производством, где высокий уровень превышения составлял 23,3 %, очень высокий – 49,6 % [15].

Кроме того, в металлургическом производстве имеется 39 неорганизованных источников выбросов, общий неканцерогенный риск по которым составляет 0,8, превышение предельно допустимого уровня риска в 40 раз. Результаты расчетов экологического риска от выбросов в атмосферу металлургического комбината представлены в таблице.

В России впервые выполнены расчет и оценка экологического риска от производственной деятельности металлургического предприятия. Предложенные рекомендации по технологическим приемам малозатратны и позволят снизить содержание в воздухе рабочей зоны вредных веществ и приблизиться к достижению оптимальных условий труда (первый класс).

Расчет экологического риска наглядно подтвердил основные экологические проблемы металлургического производства: необходимость увеличения высоты семи дымовых труб в аглоизвестковом и доменном производствах; необходимость регулирования работы существующего очистного оборудования в сталеплавильном, прокатном и литейном производствах; необходимость решать проблему неорганизованных выбросов.

Выводы. Установлены количественные характеристики экологического риска для каждого компонента, каждого источника газоздушных выбросов в атмосферу металлургического производства; проведено ран-

Экологические риски от выбросов в атмосферу металлургического комбината

Ecological risks from emissions of metallurgical plant into the atmosphere

Наименование производства	Число источников, шт	Risk _{нкц}	Уровень превышения Risk _{нкц}
Организованные источники выбросов			
Аглоизвестковое производство	71	0,39000	Очень высокий, в 19,5 раз
Доменный цех	33	0,16000	Очень высокий, в 8 раз
Сталеплавильное производство	42	0,17000	Очень высокий, в 8,5 раз
Прокатное производство	14	0,04100	Высокий, в 2,05 раз
Литейный цех	48	0,21000	Очень высокий, в 10,5 раз
Итого:	208	0,68000	Очень высокий, в 34 раза
Неорганизованные источники выбросов			
Аглоизвестковое производство	4	0,55000	Очень высокий, в 27,5 раз
Доменный цех	16	0,43000	Очень высокий, в 21,5 раз
Сталеплавильное производство	12	0,05400	Высокий, в 2,7 раз
Прокатное производство	5	0,18000	Высокий, в 9 раз
Литейный цех	2	0,00023	Низкий
Итого:	39	0,80000	Очень высокий, в 40 раз

жирование источников выбросов по приоритетности их влияния на здоровье работающих; заложены основы управления техносферной безопасностью металлургического производства; обоснованы приоритетные объекты снижения выбросов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анализ и оценка риска производственной деятельности: Учебн. пособие / П.П. Кукин, В.Н. Шлыков, Н.Л. Пономарев, Н.И. Сердюк. – М.: Абрис, 2012. – 327 с.
2. Меньшиков В.В., Швыряев А.А., Захарова Т.В. Анализ риска при систематическом загрязнении атмосферного воздуха опасными химическими веществами: Учебн. пособие – М.: изд. МГУ, 2005. – 120 с.
3. Ваганов П.А., Ман-Сунг Им. Экологические риски: Учебн. пособие. 2-е изд. – СПб.: изд. СПбУ, 2001. – 152 с.
4. Риск воздействия химического загрязнения окружающей среды на здоровье населения: от оценки к практическим действиям / С.М. Новиков, Т.А. Шашина, И.Л. Абалкина, Н.С. Скворцова; под ред. Ю.А. Рахманина. – М.: Издательское товарищество «АдамантЪ», 2003. – 84 с.
5. Окружающая среда. Оценка риска для здоровья (мировой опыт) / С.Л. Авалиани, М.М. Андрианов, Е.В. Печеников и др. – М.: Консультационный центр по оценке риска здоровью, 1996. – 159 с.
6. Ларсон Б., Голуб А.А. Основные положения методических рекомендаций по анализу эффективности мероприятий по охране атмосферного воздуха на основе расчета затрат на сокращение риска. – М.-Л.: Гидрометеиздат, 1997. – 22 с.

7. Осокина А.А., Павлович Л.Б., Лупенко В.Г. Оценка экологического риска от загрязнений атмосферного воздуха при выдаче кокса // Вестник СибГИУ. 2012. № 2 С. 46 – 49.
8. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. – М., Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 97 с.
9. Бланк инвентаризации источников загрязнения атмосферного воздуха промплощадки ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК». – Новокузнецк: изд. ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», 2011. – 53 с.
10. Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду / Г.Г. Онищенко, С.М. Новиков, Ю.А. Рахманин и др. – М.: НИИЭЧиГОС, 2002. – 408 с.
11. Окружающая среда и здоровье: подходы к оценке риска / А.П. Щербо, А.В. Киселев, К.В. Негриенко и др. – СПб: изд. СПб. ун-та, 2002. – 376 с.
12. Меньшиков В.В. Концептуальные основы оценки экологического риска: Учебн. пособие. – М.: Изд-во МНЭПУ, 2001. – 44 с.
13. Павлович Л.Б., Шубина А.О. Оценка экологического риска от выбросов в атмосферу аглоизвесткового производства // Вестник СибГИУ. 2014. № 1. С. 47, 48.
14. Макаров А.В., Радаев А.В. Расчет экологического риска от организованных источников выбросов агломерационного производства. – В кн.: Труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения». – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2014. Вып. 18. Ч. 2. С. 82 – 84.
15. Павлович Л.Б., Медведская Е.В., Суржигов Д.В., Лупенко В.Г. Оценка экологического риска от деятельности коксохимического производства // Кокс и химия. 2013. № 5. С. 33 – 40.

Поступила 26 апреля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 12, pp. 901–905.

THE ESTIMATION OF ECOLOGICAL RISK OF PRODUCTION ACTIVITIES OF METALLURGICAL PLANT

L.B. Pavlovich, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Power and Ecology”

S.G. Korotkov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair “Thermal Power and Ecology”

A.A. Osokina, Postraduate of the Chair “Thermal Power and Ecology” (osokina.alina@inbox.ru)

Siberian State Industrial University (42, Kirov str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

Abstract. The paper presents the estimation of the ecological risk from atmosphere pollution by the practical activities of the metallurgical factory OJSC «EVRAZ ZSMK» from all organized and unorganized emissions sources of manufactories: ore-preparation, agglomeration, blast furnaces, steel-smelting, rolling and foundry. It has been shown, that non-carcinogenic ecological risk of chronic intoxication is not higher than acceptable level of 75 % from all the organized sources (208 items), high risk – of 22.1 %, very high – of 2.9 %. Non-carcinogenic ecological risk from all unorganized sources (39 items) is higher than the acceptable level in 40 times. To reduce organized emissions it has been proposed to increase the height of the pipes in manufactories of ore-preparation, agglomeration and blast furnaces, to control of nose section of the Venturi’s tube and cyclone SIOT in manufactories of steel-smelting, rolling and foundry. The proposed recommendations of technological methods are cost-effective and will allow reducing the content of airborne hazardous substances and closing to achieving optimal working conditions (first class).

Keywords: organized sources of emissions, unorganized sources of emissions, carcinogenic and non-carcinogenic substances, ecological risk, agglomeration, blast furnace, steel-smelting, rolling, foundry.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-901-905

REFERENCES

1. Kukin P.P., Shlykov V.N., Ponomarev N.L., Serdyuk N.I. *Analiz i otsenka riska proizvodstvennoi deyatel'nosti: Uchebnoe posobie* [Analysis and estimation of production activity risk: Manual]. Moscow: Abris, 2012. 327 p. (In Russ.).
2. Men'shikov V.V., Shvyryaev A.A., Zakharova T.V. *Analiz riska pri sistematicheskoy zagryaznenii atmosfernogo vozdukha opasnymi khimicheskimi veshchestvami. Uchebn. Posobie* [Risk analysis at systematical pollution of the atmosphere with hazards chemical substances. Manual]. Moscow: MGU, 2005. 120 p. (In Russ.)
3. Vaganov P.A., Man-Sung Im. *Ekologicheskie riski: Uchebn. Posobie* [Ecological risks: Manual]. St. Petesburg: ISPb un-ta, 2001. 152 p. (In Russ.)
4. Novikov S.M., Shashina T.A., Abalkina I.L. etc. *Risk vozdeystviya khimicheskogo zagryazneniya okruzhayushchei sredy na zdorov'e naseleniya: ot otsenki k prakticheskim deystviyam* [Risk of chemical pollution influence of the environment on the population health: from estimation to practical actions]. Rakhmanin Yu.A. ed. Moscow: Adamant, 2003. 84 p. (In Russ.)
5. Avaliani S.L., Andrianov M.M., Pechennikov E.V. etc. *Okruzhayushchaya sreda. Otsenka riska dlya zdorov'ya (mirovoi opyt)* [Environment. Risk estimation for health (world experience)]. Moscow:

- Konsul'tatsionnyi tsentr po otsenke riska zdorov'yu, 1996. 159 p. (In Russ.).
6. Larson B., Golub A.A. *Osnovnye polozheniya metodicheskikh rekomendatsii po analizu effektivnosti meropriyatiy po okhrane atmosfery vozdukh na osnove rascheta zatrat na sokrashchenie riska* [Main positions of recommended practice on the efficiency analysis of the measures on the atmosphere protection based on the calculation of the expenses to risk decrease]. Moscow: 1997. 22 p. (In Russ.).
 7. Osokina A.A., Pavlovich L.B., Lupenko V.G. Estimation of ecological risk from the atmosphere pollution at coke output. *Vestnik SibGIU*. 2012, no. 2, pp. 46–49. (In Russ.).
 8. *Metodika rascheta kontsentratsii v atmosferynom vozdukh vrednykh veshchestv, soderzhashchikhsya v vybrosakh predpriyatiy. OND–86* [Calculation methods of harmful substances concentration in the atmosphere, contained in enterprise emissions. OND-86]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. 97 p. (In Russ.).
 9. *Blank inventarizatsii istochnikov zagryazneniya atmosferynogo vozdukh promyshchadki OAO "EVRAZ ZSMK"* [Inventory form of pollution sources of the atmosphere of industrial areas of OJSC "EVRAZ ZSMK"]. Novokuznetsk: OAO EVRAZ ZSMK, 2011. 53 p. (In Russ.).
 10. Onishchenko G.G., Novikov S.M., Rakhmanin Yu.A. etc. *Osnovy otsenki riska dlya zdorov'ya naseleniya pri vozdeistvii khimicheskikh veshchestv, zagryaznyayushchikh okruzhayushchuyu sredu* [Basics of risk estimation for population health at the exposure of chemical substances, polluting the environment]. Moscow: NIEChIGOS. 2002. 408 p. (In Russ.).
 11. Shcherbo A.P., Kiselev A.V., Negrienko K.V. etc. *Okruzhayushchaya sreda i zdorov'e: podkhody k otsenke riska* [Environment and health: approaches to risk estimation]. St. Petesburg, 2002. 376 p. (In Russ.).
 12. Men'shikov V.V. *Kontseptual'nye osnovy otsenki ekologicheskogo riska: Uchebn. posobie* [Conceptual basics of ecological risk estimation: Manual]. Moscow: MNEPU. 2001. 44 p. (In Russ.).
 13. Pavlovich L.B., Shubina A.O. Ecological risk estimation from emissions into the atmosphere by agglomerative- calcic production. *Vestnik SibGIU*. 2014, no. 1, pp. 47–48. (In Russ.).
 14. Makarov A.V., Radaev A.V. Calculation of the environmental risk from organized sources of emissions of sinter production. In: *Trudy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Nauka i molodezh': problemy, poiski, resheniya"* [Proceedings of All-Russian scientific conference of students, post-graduate students and young scientists "Science and youth: problems, searches, solutions"]. Novokuznetsk: SibGIU. 2014. Vol. 18. Part 2, pp. 82–84. (In Russ.).
 15. Pavlovich L.B., Medvedskaya E.V., Surzhikov D.V., Lupenko V.G. Ecological risk estimation from the activity of by-product coke plants. *Koks i khimiya*. 2013, no. 5, pp. 33–40. (In Russ.).

Received April 26, 2015

ДИАГНОСТИКА АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ЛЕНТОЧНЫХ ТРАНСПОРТЕРОВ В ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Савельев А.Н.¹, к.т.н., доцент кафедры машин и агрегатов
технологического оборудования (Savelyev2000@mail.ru)

Кипервассер М.В.¹, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования
Аниканов Д.С.², инженер-наладчик, аспирант СибГИУ

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

² ООО «Пусконаладочное управление объединенной компании «Сибшахтострой» (ООО «ПНУ ОК «СШС»)
(654000, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, Кузнецкое шоссе, 9)

Аннотация. В работе выявляется характер динамического взаимодействия между механическими и электрическими параметрами привода при возникновении в механической части конвейера внезапных повреждений. Дана оценка возможности использования характера изменения системы электрических параметров электродвигателя в качестве диагностирующего сигнала. Составлена совместная модель для исследования динамических процессов в системе питающая сеть – асинхронный двигатель – ленточный конвейер. Питающая сеть и асинхронный двигатель описаны моделью пространства состояний четвертого порядка с получением на выходе значения момента на валу электродвигателя. Для механической части ленточного конвейера были определены моменты инерции и податливости связей между звеньями. Путем постепенного выделения элементов с минимальным моментом инерции и распределения момента инерции этих элементов и податливостей между соседними элементами была получена 3-х массовая система, моделирующая механическую часть исследуемого агрегата. Составленная динамическая модель решена в среде Matlab Simulinc. Получены данные об энергетических показателях привода в динамических процессах, следующих за возникновением аварийных ситуаций в механизме.

Ключевые слова: конвейер, асинхронный электродвигатель, электромеханическое преобразование, динамическая модель.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-906-911

Конвейерно-транспортные машины различной мощности, производительности и протяженности являются одним из основных видов грузового транспорта на предприятиях по переработке исходных материалов в горно-металлургической промышленности. От надежной, ритмичной и безотказной работы этих агрегатов напрямую зависят производительность и другие экономические показатели деятельности предприятия в целом [1].

Работа узлов и деталей таких конвейерных линий сопровождается интенсивным воздействием механических нагрузок, что неизбежно приводит их в неработоспособное состояние. Степень внезапности и сложности повреждения определяет продолжительность простоя оборудования, затраты на ремонт, размер ущерба. В этой связи рациональным образом организованная диагностика состояния эксплуатируемого оборудования является одним из условий бесперебойной работы агрегатов и предприятия в целом [2, 3]. В случае применения диагностических средств к ленточным конвейерам необходимо иметь в виду, с одной стороны, тот факт, что во многих случаях конвейерные механизмы в течение эксплуатационных периодов работают без наблюдения персонала, либо при его малой численности. По этой причине сами аварии выявляются несвоев-

ременно, а их характер определяется зачастую неверно, что увеличивает потери производства. С другой стороны, набор элементов в конвейере, способных выходить из строя, чрезвычайно велик и установить необходимое количество частных диагностических устройств для их контроля практически невозможно. В силу сказанного выше в настоящей работе рассматривается возможность обеспечивать работоспособное состояние ленточного конвейера по величине потока энергии, передаваемой от системы питания конвейера электродвигателя, а затем механической его части. Возможность использования такого подхода частично была рассмотрена ранее [4, 5].

В работах [3, 5] изложена методика контроля аварийных ситуации в механической части конвейерного транспорта путем регистрации отклонения электрических параметров электродвигателей привода. Установлены зависимости, описывающие отклонения электрических параметров двигателя при возникновении различного рода повреждений элементов механической части. Однако полученные зависимости относятся только к установившемуся режиму работы машины и полных представлений о характере изменения электрических параметров привода при возникновении повреждений не дают. Таким образом, комплекс пере-

ходных процессов, возникающих в результате аварийной ситуации, остается пока не изученным.

В настоящей работе выявляли характер динамического взаимодействия между механическими и электрическими параметрами при возникновении в механической части привода внезапных повреждений и дается оценка возможности использования характера изменения системы параметров электродвигателя в качестве диагностирующего сигнала. Исследование динамических процессов в электромеханической системе выполнялось путем численного эксперимента. Для этого был взят реальный конвейер марки НЕ-К (рис. 1) и разработана математическая модель, описывающая все процессы, происходящие в его электромеханической части. Конвейер представляет собой замкнутую ленту, огибающую приводной и натяжной барабаны. В промежутке между барабанами лента опирается на ряд роликовых опор, закрепленных на раме конвейера. Привод конвейера состоит из коническо-цилиндрического редуктора с асинхронным электродвигателем номинальной мощности 25 кВт. Двигатель питается от сети с линейным напряжением 380 В и имеет следующие внутренние параметры, полученные в результате расчета [6, 7]: сопротивление статора 4 Ом; индуктивность статора $2 \cdot 10^{-3}$ Гн; сопротивление ротора 2 Ом; индуктивность ротора $2 \cdot 10^{-3}$ Гн; взаимная индуктивность $10 \cdot 10^{-3}$ Гн; частота питающей сети 50 Гц; момент инерции $1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. В состав механической части привода входят ротор электродвигателя, редуктор, приводной барабан, лента, опорные и поддерживающие ролики и натяжной барабан.

Для составления динамической модели привода конвейера был использован подход, описанный в работе [8], согласно которому все механические детали привода, включая и транспортную ленту, разделены на простые геометрические элементы. У каждого из элементов определены его момент инерции и податливость. Одновременно все эти участки деталей приведены к валу двигателя. В результате таких действий

у механической части привода конвейера выделены 25 простых элементов, которые и составили первоначальную динамическую модель. Затем путем постепенного выделения элементов с минимальным моментом инерции и распределения момента инерции этих элементов и податливостей между соседними сложная 25-массовая модель была приведена к 3-массовой (рис. 2) [9], где $J_1 = 0,153 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $J_2 = 0,392 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $J_3 = 0,08 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, $C_{12} = 167,8 \text{ (Н} \cdot \text{м)/рад}$, $C_{23} = 141,4 \text{ (Н} \cdot \text{м)/рад}$.

Основываясь на принципе Даламбера, поведение полученной динамической модели описали системой следующих трех уравнений:

$$\left. \begin{aligned} J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) &= M_{\text{дв}}; \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} - C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) + C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) &= -M_2; \\ J_3 \frac{d\omega_3}{dt} - C_{23}(\varphi_2 - \varphi_3) &= -M_3, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ и $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – скорости движения и углы поворота масс модели; C_{12} и C_{23} – жесткость связей между массами модели 1 и 2, 2 и 3; $M_{\text{дв}}$ – момент, создаваемый асинхронным двигателем; M_2 – момент от технологической нагрузки грузовой части ленты конвейера; M_3 – момент, создаваемый технологической нагрузкой холостой части ленты конвейера.

Для определения значений статических моментов M_2 и M_3 по методике, изложенной в работе [10], рассчитали диаграмму сил натяжения ленты конвейера. Значение разности сил натяжения ленты в точках 8 и 4 (рис. 1), умноженное на радиус барабана, а затем приведенное к валу двигателя, составило величину M_2 . Аналогичным образом, используя силы натяжения ленты в точках 1 и 4 (рис. 1), получили значение момента M_3 .

При математическом описании процессов электромеханического преобразования энергии электродвигателем синусоидальные изменения реальных пере-

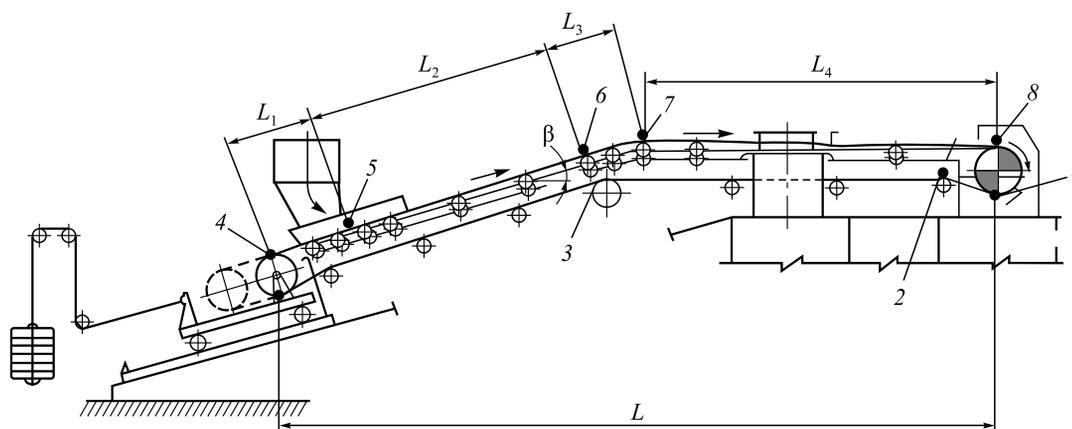


Рис. 1. Общий вид конвейера

Fig. 1. General view of the conveyor

менных электромашины преобразуются в постоянные величины.

Модель асинхронной машины включает в себя электрическую часть, представленную моделью пространства состояний четвертого порядка с описанием момента, возникающего на валу двигателя [11]. Все электрические переменные и параметры машины приведены к статору:

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_s &= R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} + j\omega_k \bar{\psi}_s; \\ 0 &= R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} + j(\omega_k - p\omega_m) \bar{\psi}_r; \\ \bar{\psi}_s &= L_s \bar{i}_s + L_m \bar{i}_r; \\ \bar{\psi}_r &= L_m \bar{i}_s + L_r \bar{i}_r; \\ M_{дв} &= \frac{3}{2} pk_r Mod(\bar{\psi}_r \bar{i}_s); \\ J \frac{d\omega_m}{dt} &= M - M_n, \end{aligned} \right\} (2)$$

где \bar{u}_s – напряжение питающей сети; R_s и R_r – сопротивление статора и ротора; $\bar{\psi}_s$ и $\bar{\psi}_r$ – потокосцепление статора и ротора; L_s и L_r , \bar{i}_s и \bar{i}_r – индуктивность и ток статора и ротора; $M_{дв}$ – момент двигателя; p – число пар полюсов асинхронного двигателя; L_m – взаимная индуктивность между статором и ротором; M_n – момент рабочего механизма, приведенный к валу; M – электромагнитный момент машины; J – момент инерции на валу машины; ω_m и ω_k – угловые скорости вала машины и системы координат; k_r – коэффициент соотношения взаимной индуктивности и индуктивности ротора.

После соответствующих преобразований уравнения примут вид

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_s - r \bar{i}_s + L'_s \frac{d\bar{i}_s}{dt} + j\omega_k L'_s \bar{i}_s - \frac{k_r}{T_r} \bar{\psi}_r + jk_r p \omega_m \bar{\psi}_r; \\ 0 = -k_r R_r \bar{i}_s + \frac{1}{T_r} \bar{\psi}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} + j(\omega_k - p\omega_m) \bar{\psi}_r; \\ M = \frac{3}{2} pk_r Mod(\bar{\psi}_r \bar{i}_s); \\ J \frac{d\omega_m}{dt} = M - M_n, \end{aligned} \right\} (3)$$

$$\text{где } r = (R_s + k_r^2 R_r); L'_s = \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right); k_r = \frac{L_m}{L_r}; T_r = \frac{L_r}{R_r}.$$

В неподвижной комплексной системе координат ($\omega_k = 0$) вещественная ось обозначается «а», а мнимая «β». Пространственные вектора в этом случае раскладываются по осям: $\bar{u}_s = u_{s\alpha} + ju_{s\beta}$, $\bar{i}_s = i_{s\alpha} + ji_{s\beta}$, $\bar{\psi}_r = \psi_{r\alpha} + j\psi_{r\beta}$. Подставив эти значения в уравнения и приравняв отдельно вещественные и мнимые части, операторная форма уравнений будет иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} u_{s\alpha} &= r(1 + T'_s s) i_{s\alpha} - \frac{k_r}{T_r} \psi_{r\alpha} - k_r p \omega_m \psi_{r\beta}; \\ u_{s\beta} &= r(1 + T'_s s) i_{s\beta} - \frac{k_r}{T_r} \psi_{r\beta} + k_r p \omega_m \psi_{r\alpha}; \\ 0 &= -k_r R_r i_{s\alpha} + \frac{1}{T_r} (1 + T_r s) \psi_{r\alpha} + p \omega_m \psi_{r\beta}; \\ 0 &= -k_r R_r i_{s\beta} + \frac{1}{T_r} (1 + T_r s) \psi_{r\beta} - p \omega_m \psi_{r\alpha}; \\ M_{дв} &= \frac{3}{2} pk_r (\psi_{r\alpha} i_{s\beta} - \psi_{r\beta} i_{s\alpha}); \\ J s \omega_m &= M_{дв} - M_n = M_{дв} = C_{12} (\varphi_2 - \varphi_1), \end{aligned} \right\} (4)$$

$$\text{где } T'_s = \frac{L'_s}{r}.$$

Полученная в процессе составления динамической модели система уравнений была решена в среде программирования Matlab [12 – 14]. Для этого была составлена функциональная схема (рис. 3), включающая блок источника питания 1, блок моделирования асинхронного двигателя 2 и блок моделирования механической трехмассовой части ленточного конвейера 3. В блоке 1 смоделирован трехфазный источник переменного напряжения $U = 380$ В стандартной частоты $f = 50$ Гц. Блок 2 содержит модель асинхронного электродвигателя, составленную при помощи стандартных блоков из библиотеки Simulink, с учетом соотношений параметров, показанных в системе уравнений (4). Механическая трехмассовая система в блоке 3 составлена при помощи блоков Integrator, имеющих расчетные моменты инерции и охваченных обратными связями расчетной жесткости. Связь между блоками происходит при помощи сумматоров [15].

В процессе моделирования режима выхода элементов конвейера из строя рассматривались три случая:

- режим работы конвейера без повреждений под воздействием номинальной нагрузки (рис. 2);
- процесс работы конвейера с заклиниванием одного опорного ролика грузовой части ленты конвейера и скачкообразного увеличения на 1,5 Н·м нагрузки, приложенной ко второй массе динамической модели конвейера;
- процесс работы конвейера с выходом двух опорных роликов грузовой части ленты конвейера из строя и скачкообразного увеличения на 3 Н·м нагрузки, приложенной ко второй массе динамической модели конвейера.

Характер изменения тока статора при моделировании вышеперечисленных вариантов показан на рис. 4, откуда видно, что при возникновении поломок с различной степенью увеличения нагрузки возникает скачкообразный рост потребляемой энергии статором двигателя, что выражается в повышении тока в обмотке статора. Значение этого увеличения в каждом из опытов численного эксперимента показано на графиках (рис. 4).

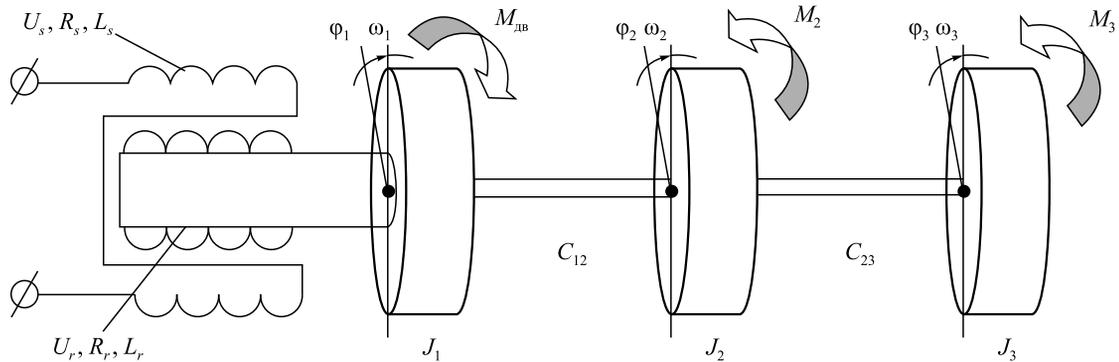


Рис. 2. Динамическая модель привода конвейера

Fig. 2. Dynamic drive model of the conveyor

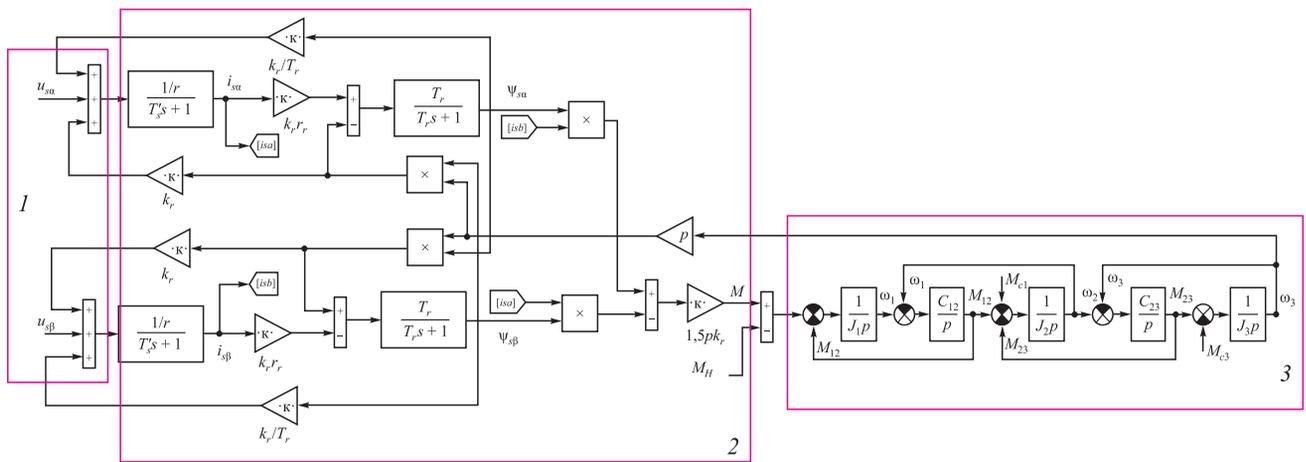


Рис. 3. Функциональная схема

Fig. 3. Functional scheme

Выводы. Повреждения конвейера типа заклинивания грузонесущих роликов вызывают увеличение потребляемой конвейером энергии, что проявляется в изменении параметров потребляемой из сети электрической мощности. При моделировании возникновения повреждения посредством приложения дополнительного момента к одной из движущихся масс переходный процесс в цепи статора длится 0,024 с. Скорость двигателя при этом снижается на 0,04 %. Ток статора электродвигателя возрастает на 0,45 – 0,52 % от текущих значений в нормальном режиме. При поломке двух роликов длительность переходного процесса остается прежней, снижение скорости составляет 0,08 %, ток статора двигателя возрастает на 0,91 – 1,03 % от текущих значений в нормальном режиме. Такое изменение параметров электродвигателя достаточно четко может быть выделено существующей на сегодняшний день измерительной аппаратурой и идентифицировано аппаратными средствами, контролирующими систему питания привода. Таким образом, постоянное отслеживание моментов изменения тока статора и сопоставление их со скоростными условиями работы

привода может быть использовано в качестве диагностического сигнала, предупреждающего о возникновении аварийной ситуации на транспортном участке конвейера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Большаков А.С. Углеобогащительные и брикетные фабрики. – Л.: Углетехиздат, 1982. – 240 с.
2. Биргер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
3. Носов В.В. Диагностика машин и оборудования: Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Лань, 2012. – 384 с.
4. Савельев А.Н., Кипервассер М.В., Ананьев Д.С. К обоснованию комплексного метода оценки работоспособности современных технологических объектов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 12. С. 37 – 41.
5. Савельев А.Н., Кипервассер М.В., Ананьев Д.С., Реморов В.Е. Об использовании метода контроля состояния машин технологических агрегатов по энергетическим параметрам привода // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 12. С. 31 – 33.
6. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1980. – 495 с.
7. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
8. Ключев В.И. Теория электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 696 с.

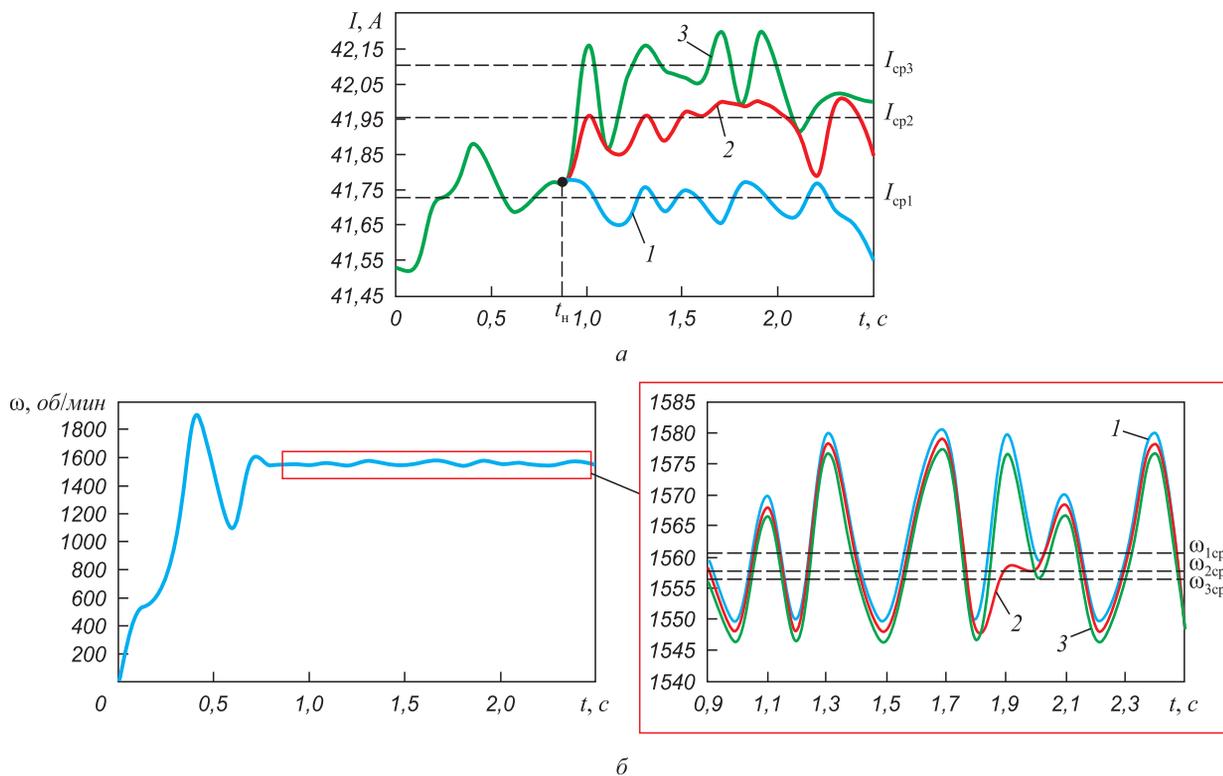


Рис. 4. Характер поведения тока статора асинхронного двигателя (а) и угловой скорости (б) при отсутствии неисправностей в конвейерной системе (1), выходе из строя поддерживающего ленту опорного ролика (2) и выходе из строя одновременно двух роликов (3): I_{cp1} и ω_{cp1} , I_{cp2} и ω_{cp2} , I_{cp3} и ω_{cp3} – средние значения тока и угловой скорости при отсутствии неисправностей конвейерной системы, при выходе из строя поддерживающего ленту опорного ролика и при выходе из строя одновременно двух роликов; t_n – время появления дефекта для случаев 1 и 2

Fig. 4. Behavior pattern of stator current of an asynchronous motor (a) and angular velocity (б) at the absence of defects in a conveyor system (1), at the failure of a bearing roller supporting the belt (2) and the failure of two rollers simultaneously (3): I_{cp1} and ω_{cp1} , I_{cp2} and ω_{cp2} , I_{cp3} and ω_{cp3} – average values of current and angular velocity at the absence of the defects in a conveyor system, at the failure of a bearing roller supporting the belt, as well as the failure of two rollers simultaneously; t_n – defect onset time for cases 1 and 2

9. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. – М.: Наука, 1988. – 639 с.
 10. Иванченко Ф.К. Расчет грузоподъемных и транспортирующих машин. – Киев: Вища школа, 1975. – 571 с.
 11. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева, А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
 12. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем. – СПб: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
 13. Дьяконов В.П. SIMULINK 4. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 528 с.
 14. Дьяконов В.П. MATLAB 6/5 SP1/7+Simulin 5/6. Основы применения. Серия «Библиотека профессионала». – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 800 с.
 15. Терехин В.Б. Моделирование систем электропривода в Simulink: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 292 с.

Поступила 13 февраля 2015 г.

THE ASSESSMENT OF POWER CHANGES IN MOTOR PARAMETERS IN CASE OF EMERGENCIES IN THE MECHANICAL PART OF BELT CONVEYOR

A.N. Savel'ev¹, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Machinery and Technological Equipment (Savelyev2000@mail.ru)

M.V. Kipervasser¹, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair of Electrical Engineering and Electrical Units

D.S. Anikanov², Service Engineer, Postgraduate

¹Siberian State Industrial University (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

²LLC Commissioning Division of the United Company "Sibshakhtostroï" (9, Kuznetskoe route, Novokuznetsk, Kemerovo region, 654000, Russia)

Abstract. The paper reveals the nature of the dynamic interaction among mechanical and electric parameters of the drive when arising in mechanical part of conveyor of the sudden damages. The estimation of the possibility to use the behavior of the system of electric parameters of electric motor as a diagnosing signal is given. The joint model was formed to study the dynamic processes in the system "supplying network – anisochronous engine – belt conveyor". The supplying network

and anisochronous engine are described by the model of problem space of the fourth order with the reception on withdrawal of the moment value on the electric motor shaft. The certain moments of inertias and softness of the relationships between sections have been defined for the mechanical part of the belt conveyor. Using the way of the gradual separation element since the minimum moment of the inertias and sharing the moment of the inertias of these elements and softness between the nearby elements, a 3-h mass system has been received. It simulates the mechanical part of the experimental unit. The formed dynamic model was solved in ambience of Matlab Simulinc. The article also presents the received data on energy factors of the drive in dynamic processes, following the emergencies in mechanisms.

Keywords: conveyor, induction motor, electromechanical conversion, dynamic model.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-906-911

REFERENCES

1. Bol'shakov A.S. *Ugleobogatitel'nye i briketnye fabriki* [Coal-cleaning and briquetting plants]. Leningrad: Uglemettekhizdat, 1982, 240 p. (In Russ.).
2. Birger I.A. *Tekhnicheskaya diagnostika* [Technical diagnostics]. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 240 p. (In Russ.).
3. Nosov V.V. *Diagnostika mashin i oborudovaniya: Uchebnoe posobie* [Machine and equipment diagnostics]. St. Petersburg: Lan', 2012, 384 p. (In Russ.).
4. Savel'ev A.N., Kipervasser M.V., Anikanov D.S. To the validation of the complex method of performance assessment of modern technological facilities. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 12, pp. 37–41. (In Russ.).
5. Savel'ev A.N., Kipervasser M.V., Anikanov D.S., Remorov V.E. On the use of the method of monitoring the condition of machinery technological units by the energy parameters of the drive. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 12, pp. 31–33. (In Russ.).
6. Kopylov I.P. *Proektirovanie elektricheskikh mashin* [Electric machine design]. Moscow: Energiya, 1980, 495 p. (In Russ.).
7. Bolotin V.V. *Prognozirovanie resursa mashin i konstruktssii* [Forecasting of machine and construction resources]. Moscow: Mashinostroenie, 1984, 312 p. (In Russ.).
8. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda* [Theory of electric drive]. Moscow: Energoatomizdat, 1985, 696 p. (In Russ.).
9. Artobolevskii I.I. *Teoriya mekhanizmov i mashin* [Theory of mechanisms and machines]. Moscow: Nauka. 1988, 639 p. (In Russ.).
10. Ivanchenko F.K. *Raschet gruzopod'emnykh i transportiruyushchikh mashin* [Calculation of load-lifting and transport vehicles]. Kiev: Vishcha shkola, 1975, 571 p. (In Russ.).
11. *Spravochnik po avtomatizirovannomu elektroprivodu* [Reference book on automated electric drive]. Eliseev V.A., Shinyanskii A.V. eds. Moscow: Energoatomizdat, 1983, 616 p. (In Russ.).
12. German-Galkin S.G. *Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh system* [Computer modeling of semiconductor systems]. St. Petersburg: KORONA print, 2001, 320 p. (In Russ.).
13. D'yakonov V.P. *SIMULINK 4. Spetsial'nyi spravochnik* [SIMULINK 4. Special reference book]. St. Petersburg: Piter, 2002, 528 p. (In Russ.).
14. D'yakonov V.P. *MATLAB 6/5 SP1/7+Simulin 5/6. Osnovy primeneniya. Seriya "Biblioteka professionala"* [MATLAB 6/5 SP1/7+Simulin 5/6. Application basics. Series "Library of a professional"]. Moscow: SOLON-Press, 2005, 800 p. (In Russ.).
15. Terekhin V.B. *Modelirovanie sistem elektroprivoda v Simulink: Uchebnoe posobie* [System modeling of electric drive in Simulink: Teaching aid]. Tomsk: Izd-vo TPU, 2010, 292 p. (In Russ.).

Received February 13, 2015

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ–КОНЦЕНТРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ПАРАМЕТРАМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ В ПРОЦЕССЕ РАЗВИТИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Башков О.В., д.т.н., профессор, начальник Центра

Коллективного Пользования «Новые материалы и технологии»

Муравьев В.И., д.т.н., профессор, главный научный консультант (vmuravyev@mail.ru)

Лончаков С.З., к.т.н., старший научный сотрудник

Фролов А.В., к.т.н., докторант

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

(681013, Россия, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27)

Аннотация. Предложены результаты теоретического и экспериментального исследования влияния концентрации напряжений на повреждаемость титановых сплавов. Исследовали образцы титановых сплавов ОТ4 (α -класс) и ВТЗ-1 ($\alpha + \beta$ -класс) с различными радиусами концентраторов напряжений. Оценено влияние концентрации напряжений на параметры акустической эмиссии при использовании образцов различных радиусов. Показаны графическая зависимость объема материала, вовлекаемого в деформацию, от распределения максимальных местных напряжений и диаграмма распределения основных параметров АЭ для образцов с различными радиусами концентраторов напряжений из сплавов ОТ4 и ВТЗ-1 в зависимости от номинального разрушающего напряжения. Приведены результаты теоретического и экспериментального исследований влияния концентрации напряжений α на повреждаемость титановых сплавов ОТ4 и ВТЗ-1. Результаты исследований могут быть использованы для разработки методик диагностирования конструкций с точки зрения определения наименее опасной формы концентратора напряжений.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, титановые сплавы, степень деформации, концентраторы напряжений, разрушающие напряжения.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-912-918

Надежность инженерных сооружений и конструкций в большой степени определяется способностью противостоять повреждаемости при эксплуатационных нагрузках [1, 2]. Наличие концентраторов напряжений может оказывать катастрофическое влияние на прочность металлоконструкций.

Исследованиями [3 – 5] при использовании анализа акустико-эмиссионной информации на стадии упругой деформации установлена возможность прогнозирования предельных характеристик материала на примере образцов сплавов ОТ4 и ВТЗ-1, а именно, установлена зависимость между механическими характеристиками материала и параметрами акустической эмиссии (АЭ).

В настоящей работе приведены результаты теоретического и экспериментального исследований влияния концентрации напряжений α на повреждаемость титановых сплавов ОТ4 и ВТЗ-1.

Для оценки влияния концентрации напряжений на параметры АЭ была проведена серия экспериментов на образцах с концентраторами напряжений, на каждый эксперимент использовали по десять образцов с различными радиусами концентраторов напряжений. Исследовали образцы двух титановых сплавов ОТ4 (α -класс) и ВТЗ-1 ($\alpha + \beta$ -класс). Концентраторы напряжений выполняли в виде выточек по краям рабочей части образцов, радиусы этих концентраторов составляли

0,5, 2,0, 5,5 и 12,0 мм. Все эксперименты проводили при скорости деформирования $v_2 = 71,1$ мм/ч.

В процессе испытания проводили регистрацию сигналов АЭ с помощью двух закрепленных на противоположных концах образца пьезоэлектрических преобразователей. Сигнал с выхода каждого датчика АЭ усиливали, фильтровали от низкочастотных помех (с частотой до 20 кГц) и амплитудно демодулировали. Далее сигнал подвергали аналого-цифровому преобразованию с частотой дискретизации 170 кГц и динамическим диапазоном 70 дБ и обрабатывали на компьютере [6, 7]. Анализировали амплитуду, длительность, энергию, плотность энергии, коэффициент формы, проводили разделение сигналов АЭ по типам генерирующих их источников по специальной методике [5, 6, 8, 9]. Для фильтрации сигналов АЭ от помех, возникающих в зоне захватов образцов, проводили локацию источников АЭ с использованием взаимно-корреляционного анализа.

Регистрация сигналов АЭ в процессе нагружения [10, 11] сопровождалась съемкой изменений микроструктуры поверхности полированных образцов. Предел прочности, приведенный в описании результатов экспериментов, рассчитывали как отношение максимальной нагрузки при деформировании образца к площади сечения нетто (сечение в узкой части образца). Для образцов с радиусом концентратора 0,5 мм

скорость счета сигналов АЭ плавно повышается с ростом степени деформации. Суммарное число сигналов АЭ и максимальная скорость счета для образцов из ОТ4 имеют большие, чем для образцов из ВТЗ-1, значения.

В обоих материалах с данным радиусом концентратора наблюдается максимальный (на уровне $0,77\sigma_b$) скачок энергии АЭ. Изменение структуры поверхности образцов, связанное, по всей видимости, с выходом групп дислокаций на поверхность, не совпадает со временем резкого выброса упругой энергии АЭ. Для материала ОТ4 изменение структуры наблюдается на уровне $0,86\sigma_b$. На основании сказанного можно сделать вывод о том, что необратимые повреждения в материале наступают задолго до того, как они становятся видимыми при помощи приборов визуального контроля. Это может быть связано с тем, что излучение порции энергии АЭ происходит при выходе группы дислокаций не только на поверхность материала, но также и на поверхность кристалла. Существует ограничение степени увеличения оптических приборов, как следствие, наблюдается более поздний момент регистрации происходящих изменений структуры. Использование электронных сканирующих микроскопов возможно лишь после проведения эксперимента. Неизбежное разгружение материала приводит к не совсем корректным результатам, так как обратное движение дислокаций при его разгрузке влечет за собой изменение структуры по сравнению с напряженным состоянием материала.

На образцах с радиусом концентратора 2,0 мм сохраняется плавный непрерывный рост суммарного числа сигналов АЭ от времени. Но при этом для сплава ВТЗ-1 более ярко выражена область текучести, что характеризуется наличием пика скорости счета к моменту разрушения материала. Суммарная энергия АЭ в среднем уменьшается по сравнению с образцами с радиусом концентратора 0,5 мм. Суммарное число сигналов АЭ при этом имеет большее значение. Видимые изменения структуры сплава ОТ4 наблюдаются на уровне $0,97\sigma_b$, сплава ВТЗ-1 – на уровне $0,88\sigma_b$.

Численные значения параметров АЭ (а именно, суммарное число сигналов и суммарная энергия АЭ) имеют еще меньшие величины на образцах с радиусом концентратора 5,5 мм. Вместе с уменьшением общего числа сигналов снижается и число сигналов, идентифицируемых как сигналы от микротрещин. Визуальные изменения структуры объектов исследований наблюдаются для сплава ОТ4 на уровне $0,95\sigma_b$, для ВТЗ-1 – на уровне $0,93\sigma_b$.

Акустическая эмиссия при нагружении образцов с радиусом концентратора 12,0 мм имеет большую активность, чем у образцов с концентратором радиусом 5,5 мм. Излучаемая при этом суммарная энергия для образцов из исследуемых материалов имеет наименьшее значение. Все сигналы АЭ равномерно распределены по всему диапазону напряжений при нагружении

материала. Начальная область нагружения, соответствующая уровню напряжений $(0,22 - 0,28)\sigma_b$, сопровождается всплеском активности АЭ. Это, вероятнее всего, связано с тем, что увеличение радиуса концентратора влияет на уменьшение локализации объема, вовлекаемого в деформацию. Другими словами, увеличивается число вовлекаемых в деформацию дефектов. При этом в гетерогенном материале всегда имеются дефекты кристаллической решетки, которые начинают проявлять себя на ранней стадии деформирования. Количество дефектов, попадающих в область концентратора напряжений, уменьшается пропорционально уменьшению радиуса концентратора.

Известно [12], что при увеличении концентрации напряжений уменьшается область материала, вовлекаемая в деформацию. Ранее установлено, что суммарное число сигналов АЭ с некоторой степенью вероятности можно описывать степенными зависимостями от действующих напряжений. Эти теоретические предположения подтверждены рядом экспериментальных данных. В литературе предлагается классифицировать все источники АЭ следующим образом: неактивные, активные, критически активные, катастрофически активные. Поскольку источник АЭ может изменять свою активность, то и классификацию источников АЭ нужно проводить с привязкой к действующим напряжениям. Так, один и тот же источник может классифицироваться как неактивный при низких нагрузках и как активный при высоких [13].

С другой стороны, справедливым будет предположение о том, что в материале всегда присутствуют дефекты структуры, которые можно разделить по их размеру на ряд групп; в первую группу можно включить все точечные и линейные дефекты кристаллической решетки (дислокации и т.д.); во вторую (в порядке увеличения размеров дефектов) несплошности между зернами; в третью – неметаллические включения, трещины; четвертая группа может характеризоваться дефектностью структуры материала с точки зрения размера зерна (чем крупнее зерно, тем менее прочны связи между ними и тем менее прочен материал в целом). Однако проведенное разделение дефектов на группы является условным. Зависимость общего числа дефектов от их размера и опасности для образца можно представить в виде экспоненциальной зависимости, что подтверждено данными АЭ.

Другой вариант классификации дефектов основан на их активности: в определенном объеме материала существует некое число дефектов, «срабатывающих» или «излучающих» при определенном уровне напряжений, возникающих в объеме. «Срабатывающим» или «излучающим» при данном напряжении следует считать дефект, который излучает импульс упругой энергии, регистрируемый при заданной чувствительности измерительной аппаратурой во время своего движения, изменения размера или развития.

Число излучающих дефектов имеет степенную зависимость от действующих напряжений (рис. 1) [13]:

$$N \sim A\sigma^n, \quad (1)$$

где A – коэффициент пропорциональности; σ – действующие в материале напряжения; n – показатель степени.

Конечное число излучающих дефектов связано с конечным возможным напряжением в материале. В данном случае речь идет о напряжениях, действующих в макрообъемах, в области, подвергнутой деформированию при приложении внешних сил. Наряду с напряжениями, действующими в макрообъемах, в материале существуют и микронапряжения, которые возникают во всех участках отдельно взятого зерна или кристалла.

При этом максимальные напряжения в микрочастицах могут достигать теоретического предела прочности материала, превышение которого ведет к разрыву молекулярных связей [14]. При увеличении числа разрывов молекулярных связей материал разрушается в том месте, где эти связи были ослаблены наличием дефектов. Все расчеты, связанные с определением теоретической прочности материалов, не учитывают их гетерогенности.

Равномерное распределение напряжений по площади поперечного сечения стержня имеет место только в тех случаях, когда поперечные сечения по длине стержня постоянны. Наличие резких изменений площади поперечного сечения вследствие резких переходов, отверстий, выточек, надрезов и т.д. приводит к неравномерному распределению напряжений и к увеличению их в отдельных местах сечения. Это явление называется концентрацией напряжений [15], а вызывающие концентрацию напряжений отверстия, выточки, царапины и т.д. являются концентраторами

напряжений. Дефекты, связанные с неоднородностью структуры материала, также могут являться концентраторами напряжений.

Увеличение коэффициента α концентрации напряжений ведет к увеличению напряжений, действующих в месте концентрации (местных напряжений)

$$\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n}, \quad (2)$$

где σ_{\max} – наибольшее местное напряжение; $\sigma_n = P/d$ – номинальное напряжение, определяется как среднее в ослабленном сечении; P – усилие в сечении; d – площадь ослабленного сечения (площадь нетто).

Отношение максимального усилия, при котором происходит разрушение образца, к исходной площади ослабленного сечения можно назвать номинальным пределом прочности.

Теоретические коэффициенты концентрации зависят от формы и размеров концентратора, имеют различные значения в зависимости от соотношения радиуса скругления к сечению в ослабленном месте.

На рис. 2 приведены графики изменения коэффициента α при различных отношениях радиуса концентратора к сечению в ослабленном месте r/d .

На основании приведенных выражений (1) и (2) выведено соотношение $N \sim \alpha_n^n$, показывающее, что при постоянном номинальном напряжении ($\sigma_n = \text{const}$) число источников АЭ пропорционально концентрации напряжений.

Справедливым будет утверждение, что объем V вовлекаемого в деформацию материала пропорционален отношению r/d .

Наиболее вероятно, что данная зависимость не является линейной. Максимальное напряжение в ослабленном сечении пропорционально концентрации напряжений $\sigma_{\max} \sim \alpha$, что следует из выражения (2).

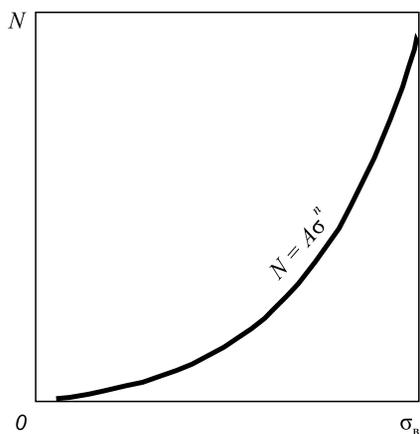


Рис. 1. Вид зависимости числа источников АЭ от действующих в материале напряжений

Fig. 1. Type of dependence of the number of AE sources on stresses operating in the material

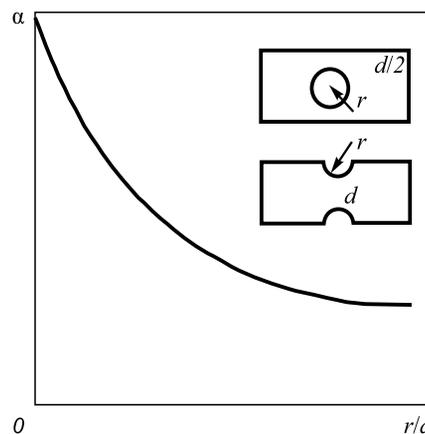


Рис. 2. Вид зависимости коэффициента концентрации напряжений от размера концентратора

Fig. 2. Type of dependence of stress concentration coefficient on the concentrator size

Зависимость объема материала, вовлекаемого в деформацию, от максимальных местных напряжений должна иметь распределение, аналогичное представленному на рис. 2.

При $\alpha = 1$ (то есть при равномерном распределении напряжений по площади поперечного сечения) объем деформируемого материала является бесконечным в предположении неограниченного размера стержня или пластины с одинаковой площадью сечения по всей длине. Но даже при одинаковой площади сечения по всей длине неограниченно длинного изделия, подвергаемого нагружению, существуют так называемые слабые места, концентрация дефектов в этих областях превышает среднюю концентрацию по всему объему материала. Это означает, что объем реального гетерогенного материала, вовлекаемого в деформацию, всегда конечен. Конечными также являются и максимальные напряжения, они зависят от формы и размера концентратора напряжений и материала.

Очевидно, что суммарное количество излучающих дефектов N при определенной концентрации напряжений может быть рассчитано как произведение числа дефектов (источников импульсов АЭ) для единичного объема $N_{уд}$ и объема материала, вовлекаемого в деформацию, при коэффициенте концентрации α_n :

$$N = N_{уд} V. \quad (3)$$

Установлено, что в зависимости от формы концентратора напряжений и, как следствие, от вида кривой изменения объема материала, вовлекаемого в деформацию, характер распределения кривой суммарного количества излучающих дефектов может быть различен. Это связано с тем, что объем материала, вовлекаемого в деформацию, как правило, зависит от свойств самого материала. Для учета чувствительности материала к местным напряжениям в расчетные формулы вводят вместо теоретического эффективный коэффициент концентрации напряжений, который определяется как отношение разрушающей нагрузки P_1 для образца без концентратора к разрушающей нагрузке P_2 такого же образца, но с концентратором напряжений ($k = P_1/P_2$). Как правило, эффективный коэффициент оказывается меньше теоретического и $1 \leq k \leq \alpha$.

Распределение общего числа сигналов можно представить в виде зависимости от радиуса концентратора напряжений (рис. 3).

Серия проведенных экспериментов позволяет подтвердить с некоторой степенью вероятности справедливость предложенной модели. На рис. 4 представлены графики распределения основных параметров АЭ в зависимости от радиуса концентратора для титановых сплавов ОТ4 и ВТ3-1. Все данные АЭ приведены не как средние значения для серии испытаний n образцов, а как результаты АЭ при растяжении конкретного образ-

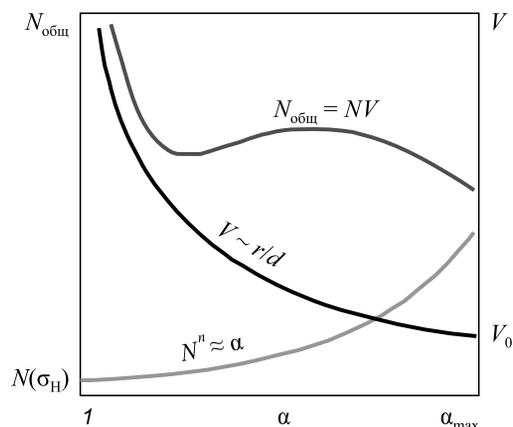


Рис. 3. Зависимость общего числа источников АЭ от концентрации напряжений

Fig. 3. Dependence of a total number of AE sources on stress concentrations

ца, параметры АЭ для которого наиболее близки к средним значениям основных параметров АЭ.

На диаграммах представлены значения параметров АЭ на момент разрушения образца. Для сплава ОТ4 максимальное суммарное число сигналов соответствует радиусу концентратора 2 мм, минимальное – радиусу 5,5 мм.

Суммарная энергия равномерно убывает с увеличением радиуса концентратора. Необходимо заметить, что максимальное значение суммарного числа сигналов и суммарной энергии АЭ соответствует образцу с бесконечным радиусом концентратора (плоский образец).

На зависимости суммарного числа сигналов можно пронаблюдать подтверждение предложенного утверждения о характере распределения этой величины. Для суммарной энергии наблюдается несколько иная картина распределения. Это связано с тем, что суммарная энергия сигналов АЭ, излучаемых дефектами при их движении, не подчиняется степенному закону распределения. Вид распределения в этом случае не установлен. Можно лишь утверждать, что наименьшее значение суммарной энергии АЭ соответствует образцам с радиусом концентратора более 12,0 мм.

Для сплава ВТ3-1 минимальное значение суммарного числа сигналов АЭ соответствует радиусу 5,5 мм (аналогично сплаву ОТ4), максимальное – радиусу 2,0 мм.

Образцу с радиусом концентратора 0,5 мм соответствует меньшее, чем для образцов с радиусом концентратора 2,0 мм, численное значение суммарного числа сигналов АЭ. По аналогии со сплавом ОТ4 можно предположить, что при увеличении радиуса концентратора сигналы АЭ будут увеличиваться. Как и в сплаве ОТ4 суммарная энергия АЭ для образцов из сплава ВТ3-1 монотонно уменьшается с ростом ра-

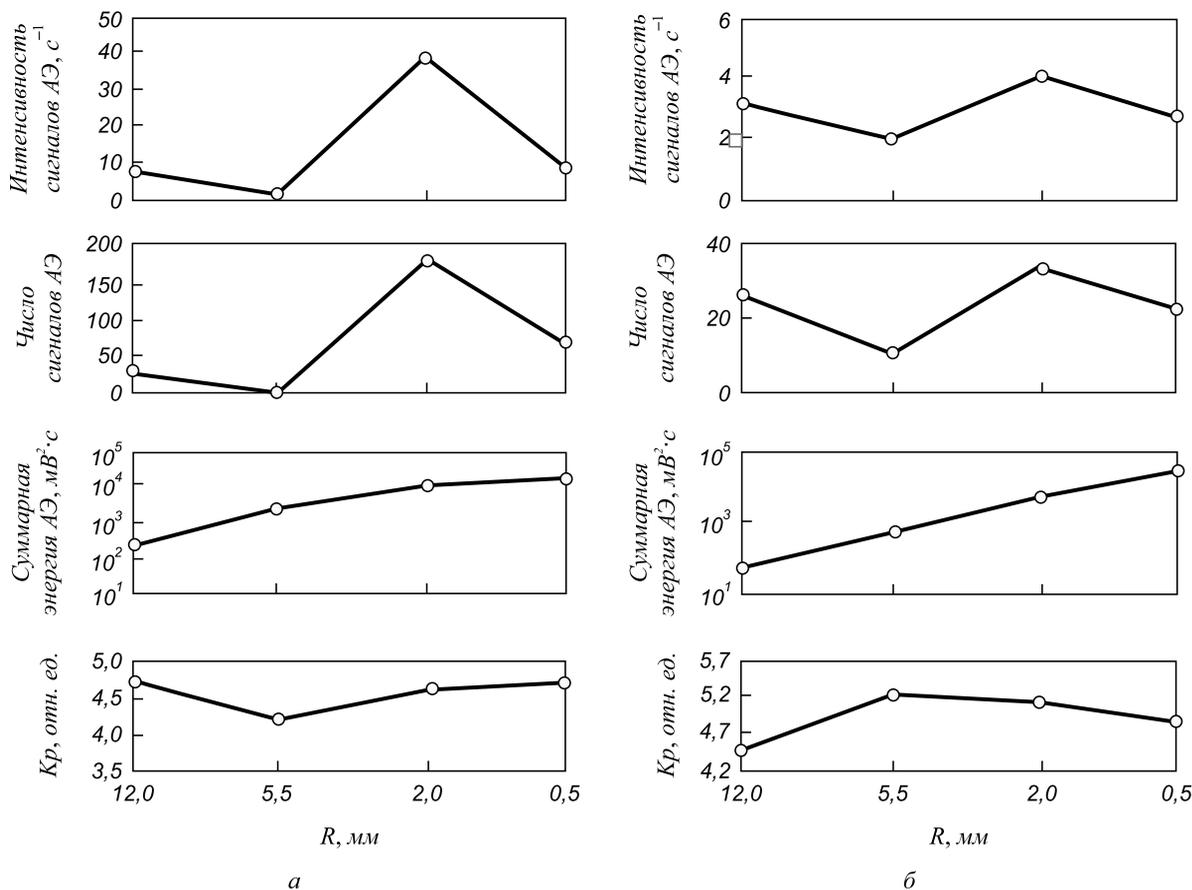


Рис. 4. Параметры АЭ на уровне $0,75\sigma_v$ в зависимости от радиуса концентратора для серии образцов из сплава ОТ4 (а) и VT3-1 (б)

Fig. 4. The AE parameters at the level of $0,75\sigma_v$ depending on the concentrator radius for a series of samples from OT4 (a) and VT3-1 (b) alloys

диуса концентратора. Минимальное значение энергии АЭ, видимо, соответствует образцам с радиусом концентратора более 12,0 мм.

При анализе экспериментальных данных установлено, что разброс номинальных разрушающих напряжений для образцов с концентраторами напряжений довольно велик и может достигать 30 %, причем он увеличивается с уменьшением радиуса концентратора и имеет большее значение для сплава VT3-1. Введение β -стабилизаторов в сплав VT3-1 улучшает его прочностные свойства, но при этом неизбежно уменьшаются пластичность материала и восприимчивость к концентрации напряжений. Это, вероятно, связано с тем, что дефекты, попадающие в область концентратора, подвержены действию больших по величине напряжений. Нахождение некоторого глобального дефекта в зоне действия концентратора является менее вероятным. Но, если это все же случается, то наличие такого дефекта катастрофически сказывается на прочностных характеристиках изделия.

На рис. 5 приведена диаграмма распределения основных параметров АЭ для образцов с различными концентраторами напряжений из сплавов ОТ4 и VT3-1 в зависимости от номинального разрушающего напряжения.

Выводы. Установленные зависимости открывают новые возможности изучения физических свойств материалов, так как могут быть перенесены с макроскопических объемов образцов на микрообъемы конкретных материалов. Выявленные результаты исследований могут быть использованы для разработки методик диагностирования конструкций с точки зрения определения наименее опасной формы концентратора напряжений в конструкциях, где наличие таких концентраторов напряжений технологически необходимо.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семашко Н.А., Филоненко С.Ф., Мокрицкая Е.Б., Беликов О.В. Прогнозирование предельного состояния в понятиях микропластической деформации материала. – В кн.: Прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в машиностроении. Сб. научных трудов. – Владивосток: Дальнаука, 1997. С. 148 – 153.
2. Коллинз Дж.А. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ. Предсказание. Предотвращение. – М.: Мир, 1983. – 615 с.
3. Филоненко С.Ф. Акустическая эмиссия. – Киев, 1999. – 304 с.
4. Семашко Н.А., Муравьев В.И., Башков О.В., Фролов А.В. Прогнозирование предельного состояния сплава ОТ4 с использованием метода акустической эмиссии // Контроль. Диагностика. 2001. № 6. С. 30, 31.
5. Семашко Н.А., Фролов А.В., Муравьев В.И., Ляховицкий М.М. Применение новых параметров акустической эмиссии для

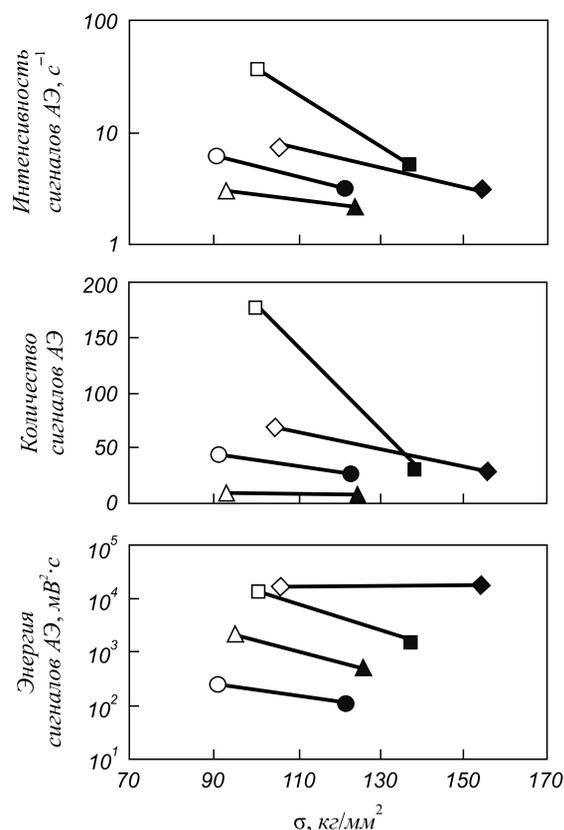


Рис. 5. Диаграммы распределения интенсивности сигналов АЭ (а), суммарного количества сигналов АЭ (б), суммарной энергии сигналов АЭ (в) образцов из сплавов ОТ4 (светлые точки) и VT3-1 (темные точки) в зависимости от номинального разрушающего напряжения при различных радиусах концентраторов напряжений: \diamond – 0,5 мм; \square – 2,0 мм; \triangle – 5,5 мм; \circ – 12,0 мм

Fig. 5. Distribution diagrams of AE signal strengths (a), general number of AE signals (b), total AE signal energy (c) of the samples from OT4 alloys (bright spots) and VT3-1 alloys (dark spots), depending on a nominal failing stress at different stress concentrator radii: \diamond – 0.5 mm; \square – 2.0 mm; \triangle – 5.5 mm; \circ – 12.0 mm

- прогнозирования предельных механических характеристик титанового сплава ОТ4 // Контроль. Диагностика. 2002. № 12. С. 24 – 27.
- Семашко Н.А., Муравьев В.И., Фролов А.В., Крупский Р.Ф. Акустическая эмиссия в исследовательской практике пластической деформации и разрушения материалов // Материаловедение. 2004. № 7. Специальный выпуск. С. 36 – 40.
 - Муравьев В.И., Фролов А.В., Дмитриев Э.А. и др. Определение эффективности использования фазовых превращений в технологических операциях изготовления конструкций из сталей и сплавов методом акустической эмиссии // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре Государственного технического университета. 2011. № III-(7). С. 91 – 100.
 - Семашко Н.А., Муравьев В.И., Фролов А.В., Физулаков Р.А. Акустическая эмиссия при решении некоторых вопросов авиационного производства // Авиационная промышленность. 2004. № 2. С. 85 – 89.
 - Грин Р.Е. Характеристика источников АЭ для оценки прочности конструкций. – В кн. АЭ в диагностике предразрушающего состояния и прогнозирования разрушения сварных конструкций: Доклады I Международной школы стран – членов СЭВ. – М.: 1986. С. 26 – 36.
 - Куранов В.Н., Иванов В.И., Рябов А.Н. Особенности амплитудного расширения АЭ при зарождении и распространении усталостных трещин // Дефектоскопия. 1982. № 5. С. 36 – 39.
 - Ляховицкий М.М., Рощупкин В.В., Минина М.А. и др. Исследование кинетики структурных эволюций и превращений в титановом сплаве VT23 акустическим и dilatометрическим методами. – В кн.: Ультразвук и термодинамические свойства вещества. Вып. 6. – Курск: изд. Курского гос. ун-та, 2009. С. 8 – 17.
 - Хруцкий О.В., Юрас С.Ф. Акустико-эмиссионный метод диагностирования судовых энергетических установок. Учебное пособие. – Ленинград, 1985. – 47 с.
 - Иванов В.И., Быков В.П. Классификация источников акустической эмиссии // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. 1985. № 1. С. 67 – 74.
 - Микляев П.Г., Нешпор Г.С., Кудряшов В.Г. Кинетика разрушения. – М.: Металлургия, 1979. – 279 с.
 - Фесик С.П. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев: Будивельник, 1982. – 280 с.

Поступила 13 января 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. VOL. 58. No. 12, pp. 912–918.

THE RESEARCH OF DEFECTS – STRESS CONCENTRATORS BY THE ACOUSTIC EMISSION PARAMETERS AT THE PROCESS OF DAMAGE DEVELOPMENT

O.V. Bashkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Centre of Collective Use “New Materials and Technologies”

V.I. Murav'ev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Mechanical Engineering and Metallurgy”, Chief Research Consultant (vmuravyev@mail.ru)

S.Z. Lonchakov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Head of the Laboratory of Spectral Analysis

A.V. Frolov, Cand. Sci. (Eng.), Doctoral

Komsomolsk-na-Amure State Technical University (27, Lenina ave., Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, 681013)

Abstract. The paper presents the results of the theoretical and experimental investigation of the influence of stress concentrators on the damaging of titanium alloys. The samples of OT4 (α -class) and VT3-1 ($\alpha + \beta$ -class) titanium alloys with different radii of stress

concentrators have been researched. It has been also estimated the influence of stress concentration on the parameters of acoustic emission when using the samples of different radii. In the article the authors have described the graphic dependence of the material volume, getting involved into the deformation, on the distribution of maximum local stresses and the distribution diagram of the main AE parameters for the samples with different radii of stress concentrators from OT4 and VT3-1 alloys in dependence on the nominal failing stress. The results of the theoretical and experimental investigation of the influence of stress concentrators α on the damaging of OT4 and VT3-1 titanium alloy have been given. The research results can be used for the development of construction-diagnostic technique on the point of view of the identification of a less dangerous form of stress concentrator.

Keywords: acoustic emission, titanium alloys, degree of deformation, stress concentrators, failing stresses.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-912-918

REFERENCES

1. Semashko N.A., Filonenko S.F., Mokritskaya E.B., Belikov O.V. Forecasting of the limiting state in the concept of material micro-plastic deformation. In: *Prikladnye zadachi mekhaniki deformiruemogo tverdogo tela i progressivnye tekhnologii v mashinostroenii. Sb. nauchnykh trudov* [Applied problems of the mechanics of deformable solids and progressive technologies in machine-building. Collected scientific papers]. Vladivostok: Dal'nauka, 1997, pp. 148–153. (In Russ.).
2. Callins Jack A. *Failure of materials in mechanical desighn. Analysis, Prediction, Prevention*. New York etc, John Wiley & Sons, 1981. (Russ.ed.: Callins J.A. *Povrezhdenie materialov v konstruktsiyakh. Analiz. Predskazanie. Predotvrashchenie*. Moscow: Mir, 1983, 615 p.).
3. Filonenko S.F. *Akusticheskaya emissiya* [Acoustic emission]. Kiev, 1999, 304 p. (In Russ.).
4. Semashko N.A., Murav'ev V.I., Bashkov O.V., Frolov A.V. Prognostication of the limiting condition of OT4 alloy with the use of acoustic emission method. *Kontrol'. Diagnostika*. 2001, no. 6, pp. 30–31. (In Russ.).
5. Semashko N.A., Frolov A.V., Murav'ev V.I., Lyakhovitskii M.M. Use of new acoustic emission parameters for the prognostication of the limiting mechanical characteristics of OT4 titanium alloy. *Kontrol'. Diagnostika*. 2002, no. 12, pp. 24–27. (In Russ.).
6. Semashko N.A., Murav'ev V.I., Frolov A.V., Krupskii R.F. Acoustic emission in a research practice of plastic deformation and material fracture. *Materialovedenie*. 2004, no. 7, Spec. Issue, pp. 36–40. (In Russ.).
7. Murav'ev V.I., Frolov A.V., Dmitriev E.A., Bashkov O.V., Tarasov E.A. Testing of phase transformation efficiency in technological operations of structure production from steel and alloys using the method of acoustic emission. *Uchenye zapiski Komsomol'skogo-na-Amure Gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011, no. III-1 (7), pp. 91–100. (In Russ.).
8. Semashko N.A., Murav'ev V.I., Frolov A.V., Fizulakov R.A. Acoustic emission at the resolution of the issues of aviation. *Aviatsionnaya promyshlennost'*. 2004, no. 2, pp. 85–89. (In Russ.).
9. Grin R.E. Characteristics of AE sources for the estimation of construction strength. In: *AE v diagnostike predrazrushayushchego sostoyaniya i prognozirovaniya razrusheniya svarnykh konstrukt-sii: Dokl. I Mezhdunarodnoi shkoly stran – chlenov SEV* [AE in the diagnostic of a predestructive state and forecasting of welded structure damagings: Report I of the International school of member countries CMEA]. Moscow: 1986, pp. 26–36. (In Russ.).
10. Kuranov V.N., Ivanov V.I., Ryabov A.N. Characteristics of the amplitude distribution of acoustic emission in the nucleation and propagation of fatigue cracks. *The Soviet journal of nondestructive testing*. 1982, vol. 18, no. 5, pp. 362–365.
11. Lyakhovitskii M.M., Roshchupkin V.V., Minina N.A., Pokrasin M.A., Krupskii R.F. Research of structural evolution kinetics and transformation in VT23 titanium alloy by acoustic and dilatometric methods. In: *Ul'trazvuk i termodinamicheskie svoystva veshchestva. Vyp. 6* [Ultrasound and thermodynamic properties of substances. Issue 6]. Kursk: izd. Kurskogo gos. un-ta, 2009, pp. 8–17. (In Russ.).
12. Khrutskii O.V., Yuras S.F. *Akustiko-emissionnyi metod diagnostirovaniya sudovykh energeticheskikh ustanovok. Uchebnoe posobie* [Acoustic-emission diagnostic technique of ship power installation. Instructional aid]. Leningrad, 1985, 47 p. (In Russ.).
13. Ivanov V.I., Bykov V.P. Classification of acoustic emission sources. *Diagnostika i prognozirovanie razrusheniya svarnykh konstrukt-sii*. 1985, no. 1, pp. 67–74. (In Russ.).
14. Miklyaev P.G., Neshpor G.S., Kudryashov V.G. *Kinetika razrushe-niya* [Fracture kinetics]. Moscow: Metallurgiya, 1979, 279 p. (In Russ.).
15. Fesik S.P. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Reference book on strength of materials]. Kiev: Budyvel'nik, 1982, 280 p. (In Russ.).

Received January 13, 2014

УДК 539.219.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ МИГРАЦИИ ТОЧЕЧНЫХ ДЕФЕКТОВ В УПОРЯДОЧЕННОМ СПЛАВЕ CuPt В УСЛОВИЯХ ДЕФОРМАЦИИ*

Сосков А.А.¹, аспирант кафедры физики им. В.М. Финкеля

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

Старостенков М.Д.², д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики

¹ Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, г. Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, 42)

² Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова

(656038, Россия, г. Барнаул, пр. Ленина, 46)

Аннотация. С помощью метода молекулярной динамики получены значения энергии миграции вакансии и межузельного атома в упорядоченном сплаве CuPt. При миграции вакансии и межузельного атома в сплаве CuPt преимущественно мигрируют атомы меди. Межузельный атом формирует в упорядоченном сплаве CuPt конфигурации, нехарактерные для чистых металлов: избыточный атом меди стремится сформировать краудин вдоль направления $\langle 110 \rangle$ в плоскости (111), содержащей атомы меди; при введении атома платины формируется гантельная конфигурация из двух атомов платины в направлении $\langle 111 \rangle$, перпендикулярном плоскости (111), содержащей атомы платины. Обнаружена высокая анизотропия миграции межузельного атома: межузельный атом в упорядоченном сплаве CuPt мигрирует, как правило, вдоль плоскостей (111), содержащих атомы меди. При упругом растяжении вдоль этой плоскости отчасти подобная анизотропия появляется при миграции вакансии, а межузельный атом в этом случае мигрирует преимущественно вдоль оси растяжения.

Ключевые слова: молекулярная динамика, упорядоченный сплав, сверхструктура, точечный дефект, вакансия, межузельный атом, диффузия, энергия миграции, деформация.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-919-924

Упорядочивающиеся сплавы и интерметаллиды имеют большое практическое значение в связи с наличием у них большого спектра уникальных физических и физико-механических свойств, таких как прочность, жаропрочность, магнитные свойства и др. [1 – 5]. Платина и сплавы платины используются в приборостроении, электронике, электротехнике, ювелирном производстве. Стабильность электрических, термоэлектрических и механических свойств, а также высокие коррозионная и термическая стойкости сделали этот металл незаменимым для современной электротехники, автоматики и телемеханики, радиотехники, точного приборостроения [3, 6 – 9]. Знание структурно-энергетических характеристик дефектов материала позволяет прогнозировать его свойства и поведение в тех или иных условиях, конструировать новые материалы с заданным набором свойств. В настоящее время из-за высокого разнообразия дефектов в упорядоченных структурах вопрос нахождения структурно-энергетических характеристик дефектов остается открытым. Для их определения (помимо экспериментальных методов) в

настоящее время эффективно используются методы компьютерного моделирования.

Точечные дефекты, вакансии и межузельные атомы играют важную роль в процессах, связанных с диффузией, деформацией, радиационным повреждением [10 – 13]. Они оказывают влияние на интенсивность диффузии, скопления точечных дефектов существенно влияют на подвижность дислокаций [5, 10, 13]. Знание энергетических и структурных характеристик необходимо для развития теоретических представлений и моделей этих процессов.

Целью настоящей работы являлось определение энергии миграции вакансии и межузельного атома в упорядоченном сплаве CuPt, имеющем сверхструктуру $L1_1$, а также исследование особенностей миграции точечных дефектов в этом сплаве в условиях одноосной упругой деформации.

Система Cu–Pt является единственной двойной системой, в которой при соответствующем стехиометрическом составе реализуется упорядоченная фаза CuPt со сверхструктурой $L1_1$ (рис. 1) [1], остающейся стабильной до относительно высоких температур (около 1080 К при точном стехиометрическом составе) [1, 3].

Упорядоченный сплав CuPt изначально создавался в молекулярно-динамической модели со структурой, со-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 13-02-00301_а, № 14-02-98000-р_сибирь_а, № 14-08-90416-Укр_а.

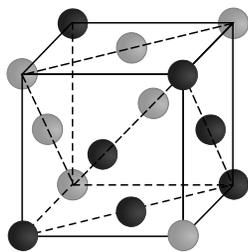


Рис. 1. Элементарная ячейка сверхструктуры L1₁ [2]

Fig. 1. Unit cell of superstructure L1₁ [2]

ответствующей ГЦК решетке. Однако, как известно [3], по сравнению с идеальной ГЦК решеткой этот сплав имеет небольшие ромбоэдрические искажения, в связи с чем после создания расчетных блоков в модели проводили их обязательную структурную релаксацию, при которой происходила небольшая деформация решетки. В завершение релаксации проводили охлаждение до 0 К.

Расчетные блоки содержали 8400 атомов, для исследования свойств точечных дефектов этого количества атомов достаточно [11, 12]. На границы блоков были наложены периодические граничные условия (имитирующие бесконечное повторение в пространстве рассматриваемого расчетного блока). Для описания межатомных взаимодействий использовали потенциалы Морза, параметры которых были взяты из работы [3]. В работе [3] эти потенциалы были апробированы при моделировании методом Монте-Карло фазового перехода порядок – беспорядок в системе Cu–Pt: температура фазового перехода для сплава CuPt с удовлетворительной точностью совпала с экспериментальными значениями.

Во всех случаях в расчетный блок вводили единственный точечный дефект: вакансию или межузельный атом. Вакансию вводили путем удаления атома меди или платины. Межузельный атом вводили путем добавления одного атома меди или платины в различные позиции решетки: с образованием гангельной конфигурации в различных направлениях, в октаэдрическую или тетраэдрическую поры. Однако несмотря на то, что межузельные атомы изначально вводили в различные позиции, они, как правило, стремились образовать единственную для каждого случая энергетически выгодную конфигурацию. При введении лишнего атома меди в любую позицию в сплаве CuPt он переходил в краудионную конфигурацию (т.е. располагался вдоль плотноупакованного ряда $\langle 110 \rangle$ в плоскости (111), содержащей атомы меди (рис. 2, а). Краудионный механизм миграции межузельного атома имеет, как было показано в работе [12], наименьшую энергию активации, т.е. следует ожидать высокой подвижности межузельного атома в сплаве CuPt. При введении лишнего атома платины в упорядоченный сплав CuPt формировалась гангель из двух атомов платины в направлении

$\langle 111 \rangle$ перпендикулярно плоскости (111), содержащей атомы платины, между двумя плоскостями меди (111) (рис. 2, б).

Следует заметить, что в чистых ГЦК металлах межузельный атом, как правило, образует гангель из двух атомов в узле, ориентированную вдоль направления $\langle 100 \rangle$ [12, 14]. Механизм и скорость миграции межузельного атома в сплаве CuPt также отличны от таковых в чистых металлах.

Для определения энергии миграции точечных дефектов проводили моделирование диффузии при различных температурах. Шаг интегрирования по времени движения атомов (при использовании метода молекулярной динамики) составлял 5 фс ($5 \cdot 10^{-15}$ с). Температуру расчетного блока задавали начальными скоростями атомов в соответствии с распределением Максвелла, при этом суммарный импульс и момент импульса атомов в расчетном блоке были равны нулю.

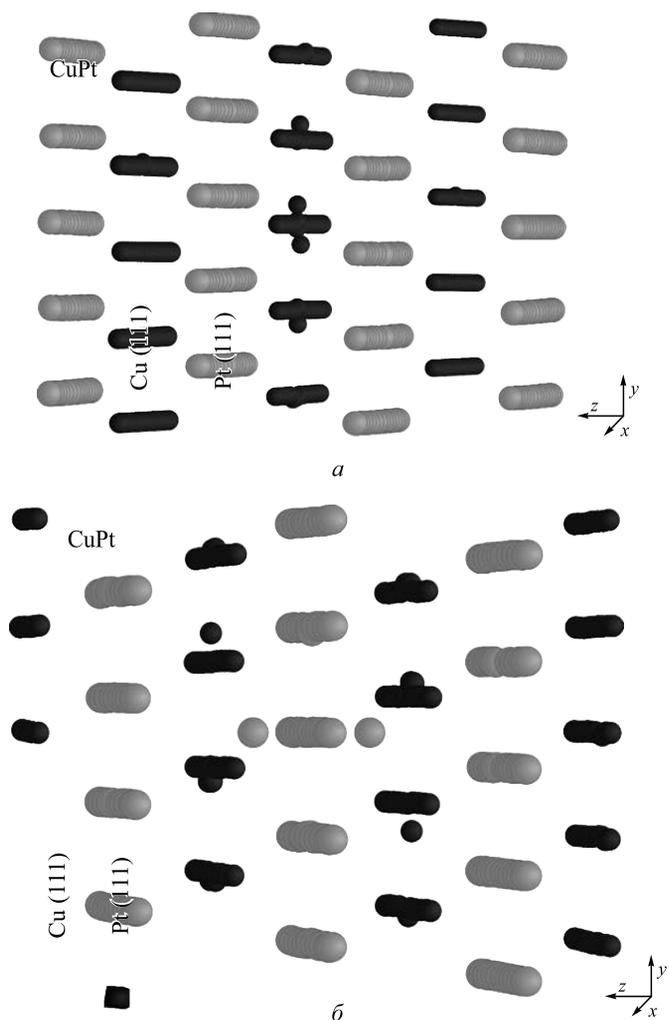


Рис. 2. Межузельные атомы меди (а) и платины (б) в упорядоченном сплаве CuPt:

● – атомы меди; ● – атомы платины

Fig. 2. Interstitial atoms of copper (а) and platinum (б) in an CuPt ordered alloy:

● – copper atoms; ● – platinum atoms

Для вычисления энергии миграции точечного дефекта в настоящей работе определяли зависимость коэффициента диффузии (D) от температуры (T) при введении в расчетный блок одного дефекта рассматриваемого типа. Энергию миграции дефекта E_m можно найти с помощью зависимости $\ln D(T^{-1})$, предварительно определив по графику тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс ($\text{tg}\alpha$) [12]:

$$E_m = -k\text{tg}\alpha = -k \frac{\partial \ln D}{\partial (T^{-1})},$$

где k – постоянная Больцмана.

С помощью полученных зависимостей $\ln D(T^{-1})$ можно также определить предэкспоненциальный множитель D_0 в соответствующем уравнении Аррениуса. В работе [12] было показано, что в случае диффузии точечного дефекта $D_0 = ND'_0$ (где N – число атомов в расчетном блоке; D'_0 – предэкспоненциальный множитель, получаемый из зависимости $\ln D(T^{-1})$ в модели при введении одного дефекта в расчетный блок).

Для нахождения коэффициентов диффузии проводили компьютерные эксперименты продолжительностью 400 – 600 пс. Коэффициент диффузии рассчитывали по формуле

$$D = \frac{1}{3} (D_x + D_y + D_z) = \frac{1}{6tN} \sum_{i=1}^N ((x_{0i} - x_i)^2 + (y_{0i} - y_i)^2 + (z_{0i} - z_i)^2), \quad (1)$$

где x_{0i}, y_{0i}, z_{0i} – координаты начального положения i -го атома; x_i, y_i, z_i – координаты i -го атома в момент времени t .

Для исключения при расчете по формуле (1) коэффициента диффузии атомных смещений, обусловленных тепловыми колебаниями атомов, расчетный блок в конце компьютерного эксперимента охлаждали до температуры, близкой к 0 К. Полученные значения энергии миграции E_m и соответствующие предэкспоненциальные множители D_0 при миграции вакансии и межузельного атома в упорядоченном сплаве CuPt приведены ниже:

Элемент	Значение параметра для			
	вакансии		межузельного атома	
	$E_m, \text{эВ}$	$D_0, \text{м}^2/\text{с}$	$E_m, \text{эВ}$	$D_0, \text{м}^2/\text{с}$
Cu	0,89	$5,8 \cdot 10^{-7}$	0,06	$7,0 \cdot 10^{-8}$
Pt	1,05	$5,0 \cdot 10^{-7}$	0,21	$5,7 \cdot 10^{-10}$
среднее значение	0,96	$5,7 \cdot 10^{-7}$	0,06	$3,4 \cdot 10^{-8}$

При рассмотрении интенсивности миграции атомов разного сорта было выяснено, что и при миграции вакансии, и при миграции межузельного атома интенсивнее мигрируют атомы меди, что, видимо, объясняется

их относительно меньшим размером и массой по сравнению с атомами платины.

Как и ожидалось, межузельный атом в сплаве CuPt имел высокую подвижность, энергия миграции составила всего 0,06 эВ. При этом наблюдали ярко выраженную анизотропию диффузии: межузельный атом мигрировал преимущественно в одной плоскости меди (111) (рис. 3). Такой характер диффузии не менялся при введении изначально лишнего атома платины: атом платины в процессе миграции, как правило, вытеснял один из атомов меди в медной плоскости и в дальнейшем уже мигрировали в основном атомы меди.

В работе рассматривали влияние одноосной деформации вдоль осей X и Z (рис. 2) на интенсивность и характер миграции точечных дефектов (деформацию вдоль оси Y в настоящей работе не рассматривали, поскольку она имеет характер влияния, аналогичный влиянию деформации вдоль оси X). Деформацию задавали в начале компьютерного эксперимента путем изменения соответствующих межатомных расстояний вдоль одной из осей. После деформирования проводили структурную релаксацию. В зависимости от деформации для выявления анизотропии миграции дефектов определяли коэффициенты диффузии вдоль трех осей: D_x, D_y, D_z . На рис. 4 и 5 приведены зависимости коэффициентов диффузии вдоль различных осей от величины одноосной деформации вдоль осей X и Z в случае миграции вакансии и межузельного атома.

Резкий рост коэффициентов диффузии при деформации сжатия свыше 3 – 4 % (рис. 4, а, б, рис. 5, а)

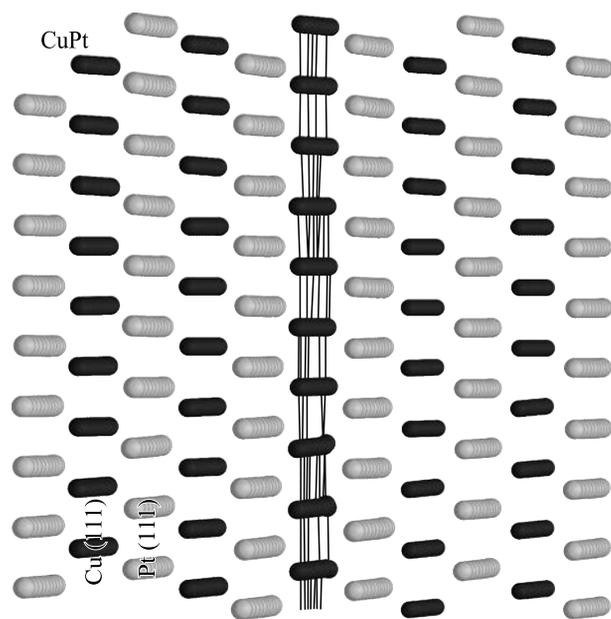


Рис. 3. Смещения атомов в результате миграции межузельного атома в сплаве CuPt при температуре 700 К в течение 150 пс:

● – атомы меди; ● – атомы платины

Fig. 3. Atoms displacement as a result of migration of an interstitial atom in an CuPt alloy at temperature of 700 K for 150 ps:

● – copper atoms; ● – platinum atoms

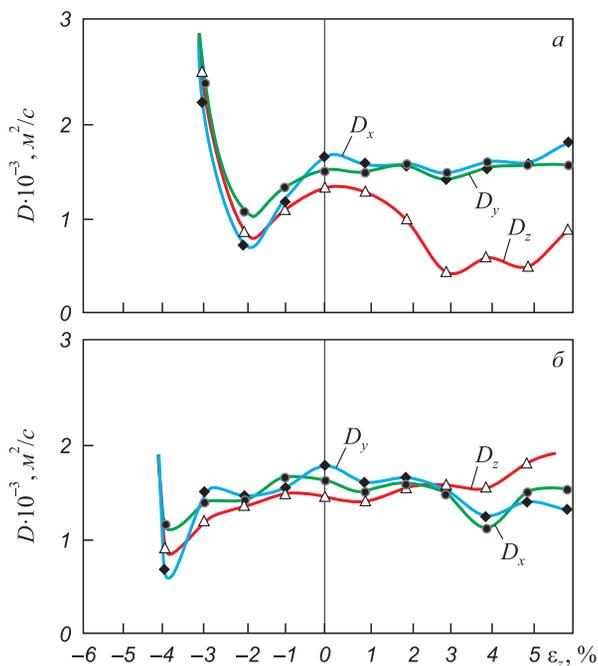


Рис. 4. Зависимости коэффициентов диффузии D_x, D_y, D_z от величины деформации вдоль осей X (а) и Z (б) в случае миграции вакансий в сплаве CuPt при температуре 1500 К (отрицательная область деформации – сжатие, положительная – растяжение)

Fig. 4. Dependences of diffusion coefficient D_x, D_y, D_z on deformation value along the axes X (a) and Z (б) in the case of vacancy migration in the CuPt alloy at temperature 1500 K (negative area of deformation – pressing, positive one – tension)

связан с интенсификацией смещений атомов в результате пластической деформации. В этом случае уже на начальной стадии компьютерного эксперимента в расчетном блоке образовывались дислокации, инициирующиеся в области точечного дефекта. Во всех других случаях (значения коэффициентов диффузии для которых входят в область построения графиков) компьютерные эксперименты проводили в условиях упругой деформации.

Ранее в работе [15] при исследовании влияния упругой деформации на интенсивность диффузии по границам фаз отмечалось, что при сжатии интенсивность зернограницной диффузии понижается, при растяжении – повышается. В настоящей работе при рассмотрении миграции точечных дефектов в сплаве CuPt подобная зависимость также прослеживается, но менее явно: для вакансий, например, при растяжении рост интенсивности диффузии практически не наблюдался (рис. 4).

Во всех случаях, независимо от величины деформации, атомы меди мигрировали интенсивнее атомов платины. При моделировании миграции межузельного атома практически все атомные смещения происходили в одной плоскости XY (111), содержащей атомы меди, аналогично примеру, изображенному на рис. 3. В этой связи коэффициент диффузии вдоль оси Z был почти равен нулю (рис. 5).

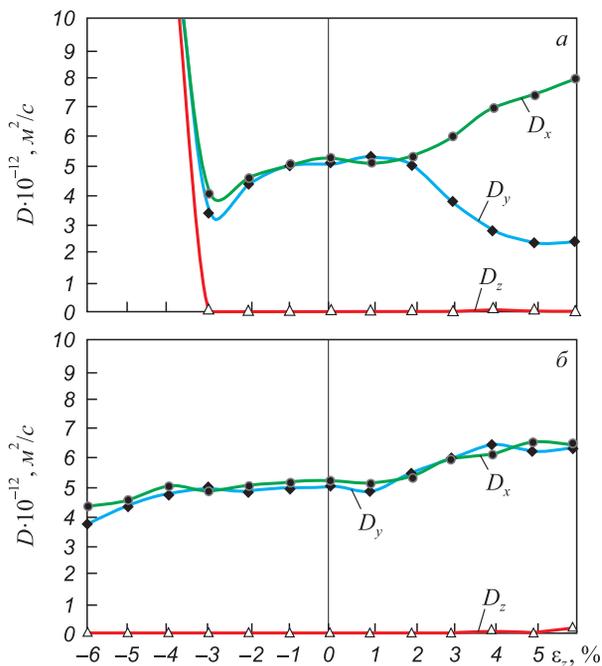


Рис. 5. Зависимости коэффициентов диффузии D_x, D_y, D_z от величины деформации вдоль осей X (а) и Z (б) в случае миграции межузельного атома в сплаве CuPt при температуре 1000 К (отрицательная область деформации – сжатие, положительная – растяжение)

Fig. 5. Dependence of diffusion coefficient D_x, D_y, D_z on deformation value along the axes X (a) and Z (б) in the case of an interstitial atom migration in the CuPt alloy at temperature 1000 K (negative area of deformation – pressing, positive one – tension)

Анизотропия миграции вакансии наблюдалась только при упругом растяжении кристалла вдоль оси X : в этом случае вакансия преимущественно мигрировала в плоскости (111), содержащей атомы меди. При растяжении вдоль оси Z наблюдалось незначительное превышение коэффициента D_z по сравнению с D_x и D_y . Однако, учитывая погрешности, нельзя утверждать о явной анизотропии в этом случае, хотя ее появление при растяжении вдоль оси Z и кажется закономерным.

Миграция межузельного атома в упорядоченном сплаве CuPt, как уже говорилось выше, почти всегда протекала в одной плоскости (111). Вместе с тем, при растяжении вдоль оси X наблюдалось еще большее «усиление» анизотропии (рис. 5, а): межузельный атом уже мигрировал не только в одной плоскости XY (111), но и преимущественно вдоль оси X . То есть в сплаве CuPt с помощью упругой деформации растяжения можно «направлять» миграцию межузельных атомов.

Выводы. С помощью метода молекулярной динамики получены значения энергии миграции точечных дефектов в упорядоченном сплаве CuPt. Выяснено, что межузельный атом формирует конфигурации, нехарактерные для чистых металлов: избыточный атом меди стремится сформировать краудион вдоль направления $\langle 110 \rangle$ в плоскости (111), содержащей атомы меди;

при введении атома платины формируется гантельная конфигурация из двух атомов платины в направлении $\langle 111 \rangle$ перпендикулярно плоскости (111), содержащей атомы платины. При миграции вакансии и межузельного атома в сплаве CuPt преимущественно мигрируют атомы меди. Миграция межузельного атома сопровождается ярко выраженной анизотропией: как правило, диффузия в данном случае протекает в одной плоскости (111), содержащей атомы меди. Причем в условиях упругого растяжения вдоль оси X межузельный атом преимущественно перемещается в направлении растяжения (вдоль оси X). Анизотропия миграции вакансии при отсутствии деформации не наблюдалась, она появляется в условиях упругого растяжения вдоль оси X : в этом случае диффузия протекает интенсивнее в плоскости XY (111), содержащей атомы меди. Влияние одноосной деформации на анизотропию миграции точечных дефектов, очевидно, объясняется уникальными особенностями сверхструктуры $L1_1$. Это позволяет, в частности, с помощью упругого деформирования «направлять» миграцию вакансий и межузельных атомов в упорядоченном сплаве CuPt, что может использоваться для создания, например, фильтров, радиационно-стойких материалов и т.д.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козлов Э.В., Дементьев В.М., Кормин Н.М., Штерн Д.М. Структуры и стабильность упорядоченных фаз. – Томск: изд. Томского ун-та, 1994. – 248 с.
2. Матвеева Н.М., Козлов Э.В. Упорядоченные фазы в двойных металлических системах. – М.: Наука, 1989. – 280 с.
3. Чаплыгина А.А. Исследование структурных и сверхструктурных превращений в сплавах системы Cu – Pt. Автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук. – Томск, 2013. – 23 с.
4. Лякишев Н.П., Алымов М.И. Наноматериалы конструкционного назначения // Российские нанотехнологии. 2006. № 1 – 2. С. 71 – 80.
5. Старенченко В.А., Соловьева Ю.В., Старенченко С.В., Ковалевская Т.А. Термическое и деформационное упрочнение монокристаллов сплавов со сверхструктурой $L1_2$. – Томск: Изд-во НТЛ, 2006. – 292 с.
6. Carr D.A., Corbitt J., Hart G.R., Gilmartin E., Hart G.L. Finding new phases for precipitate-hardening in platinum and palladium alloys // Computational Materials Science. 2012. Vol. 51. P. 331 – 339.
7. Огородникова О.М., Литвинов В.С. Кинетика упорядочения сплавов платина-никель-медь по типу $L1_0$ // Физика металлов и материаловедение. 1993. Т. 75. № 6. С. 113 – 117.
8. Власова Н.И., Щеголева Н.Н., Кандаурова Г.С., Шилова Н.Ф. Магнитная доменная структура терморазмагнитных кристаллов CoPt на ранних стадиях упорядочения при растягивающей нагрузке // Физика металлов и материаловедение. 2001. Т. 91. № 6. С. 27 – 45.
9. Артемьев Е.М., Живаева Л.В. Атомное упорядочение и магнитные свойства пленок сплавов FePd, FePt, $Fe_{50}Pd_{50-x}Pt_x$ // Известия РАН. Серия физическая. 2006. Т. 70. № 4. С. 556 – 558.
10. Старенченко В.А., Старенченко С.В., Колупаева С.Н., Пантюхова О.Д. Генерация точечных дефектов в сплавах со сверхструктурой $L1_2$ // Изв. вуз. Физика. 2000. № 1. С. 66 – 70.
11. Poletaev G.M., Dmitrienko D.V., Diabdenkov V.V., Mikrukov V.R., Starostenkov M.D. Molecular dynamics investigation of the diffusion permeability of triple junctions of tilt and mixed-type boundaries in nickel // Physics of the Solid State. 2013. Vol. 55. № 9. P. 1920 – 1924.
12. Poletaev G.M., Starostenkov M.D. Contributions of different mechanisms of self-diffusion in face-centered cubic metals under equilibrium conditions // Physics of the Solid State. 2010. Vol. 52. № 6. P. 1146 – 1154.
13. Matsukawa Y., Zinkle S.J. Dynamic observation of the collapse process of a stacking fault tetrahedron by moving dislocations // Journal of Nuclear Materials. 2004. Vol. 329-333. P. 919 – 923.
14. Zhao P., Shimomura Y. Molecular dynamics calculations of properties of the self-interstitials in copper and nickel // Computational Materials Science. 1999. № 14. P. 84 – 90.
15. Poletaev G.M., Sannikov A.V., Berdychenko A.A., Starostenkov M.D. Molecular dynamics study of plastic deformation mechanisms near the interphase boundary in two-dimensional bimetallic systems // Materials Physics and Mechanics. 2015. Vol. 22. № 1. P. 15 – 19.

Поступила 12 сентября 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. VOL. 58. NO. 12, pp. 919–924.

THE STUDY OF FEATURES OF POINT DEFECTS MIGRATION IN CuPt ORDERED ALLOY IN THE CONDITIONS OF DEFORMATION

A.A. Soskov¹, Postgraduate of the Chair of Physics named after V.M. Finkel

G.M. Poletaev², Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Head of the Chair of Advanced Mathematics and Mathematical Modeling (gmpoletaev@mail.ru)

M.D. Starostenkov², Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Head of the Chair of General Physics

¹Siberian State Industrial University (42, Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

²Altai State Technical University (46, Lenina ave., Barnaul, Altai Territory, 656038, Russia)

Abstract. The values of migration energy of vacancy and interstitial atom in CuPt ordered alloy were calculated using the method of molecular

dynamics. During migration of the vacancy and the interstitial atom mainly the Cu atoms migrate. The interstitial atom forms configurations in CuPt ordered alloy not typical for pure metals: excess Cu atom seek to form crowdion along the $\langle 110 \rangle$ direction in (111) plane containing copper atoms; in the case of introduction of Pt atom dumbbell shaped configuration of the two Pt atoms forms in the $\langle 111 \rangle$ direction perpendicular to the (111) plane containing Pt atoms. The high anisotropy of interstitial atom migration has been found: interstitial atom in CuPt ordered alloy migrates, as a rule, along (111) planes containing Cu atoms. At the tension along this plane, similar anisotropy is partly observed at vacancy migration, but interstitial atom in this case migrates mainly along the axis of tension.

Keywords: molecular dynamics, ordered alloy, superstructure, point defect, vacancy, interstitial atom, diffusion, migration energy, deformation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-919-924

REFERENCES

1. Kozlov E.V., Dement'ev V.M., Kormin N.M., Shtern D.M. *Struktury i stabil'nost' uporyadochennykh faz* [Structures and stability of ordered phases]. Tomsk: izd. Tomskogo un-ta, 1994, 248 p. (In Russ.).
 2. Matveeva N.M., Kozlov E.V. *Uporyadochennyye fazy v dvoynykh metallicheskikh sistemakh* [Ordered phases in double metallic systems]. Moscow: Nauka, 1989, 280 p. (In Russ.).
 3. Chaplygina A.A. *Issledovanie strukturnykh i sverkhstrukturnykh prevrashchenii v splavakh sistemy Cu – Pt. Avtoref. diss. kand. fiz.-mat. nauk* [Reserach of structural and superstructural transformations in the alloys of Cu – Pt system. Extended Abstract of Cand. Phys.-math. Sci. Diss.]. Tomsk, 2013, 23 p. (In Russ.).
 4. Lyakishev N.P., Alymov M.I. Nanomaterilas of structural purpose. *Rossiiskie nanotekhnologii*. 2006, no. 1-2, pp. 71–80. (In Russ.).
 5. Starenchenko V.A., Solov'eva Yu.V., Starenchenko S.V., Koval'evskaya T.A. *Termicheskoe i deformatsionnoe uprochnenie monokristallov splavov so sverkhstrukturnoi L1₂* [Thermal and strain hardening of alloy single crystals with L₁₂ superstructure]. Tomsk: izd-vo NTL, 2006. 292 p. (In Russ.).
 6. Carr D.A., Corbitt J., Hart G.R., Gilmartin E., Hart G.L. Finding new phases for precipitate-hardening in platinum and palladium alloys. *Computational Materials Science*. 2012, vol. 51, pp. 331–339.
 7. Ogorodnikova O.M., Litvinov V.S. Odering kinetics of platinum-nickel-copper alloys by L1₀ type. *Fizika metallov i metallovedenie*. 1993, vol. 75, no. 6, pp. 113–117. (In Russ.).
 8. Vlasova N.I., Shchegoleva N.N., Kandaurova G.S., Shilova N.F. Magnetic domain structure of thermally demagnetized CoPt crystals at early stages of ordering under the effect of a tensile load. *Physics of Metals and Metallography*. 2001, vol. 91, no. 6, pp. 559–577.
 9. Artem'ev E.M., Zhivaeva L.V. Atom ordering and magnetic film properties of FePd, FePt, Fe₅₀Pd_{50-x}Pt_x alloys. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*. 2006, vol. 70, no. 4, pp. 556–558. (In Russ.).
 10. Starenchenko V.A., Starenchenko S.V., Kolupaeva S.N., Pantyukhova O.D. Generation of point defects in alloys with the L1₂ superlattice. *Russian Physics Journal*. 2000, vol. 43, no. 1, pp. 61–65.
 11. Poletaev G.M., Dmitrienko D.V., Diabdenkov V.V., Mikrukov V.R., Starostenkov M.D. Molecular dynamics investigation of the diffusion permeability of triple junctions of tilt and mixed-type boundaries in nickel. *Physics of the Solid State*. 2013, vol. 55, no. 9, pp. 1920–1924.
 12. Poletaev G.M., Starostenkov M.D. Contributions of different mechanisms of self-diffusion in face-centered cubic metals under equilibrium conditions. *Physics of the Solid State*. 2010, vol. 52, no. 6, pp. 1146–1154.
 13. Matsukawa Y., Zinkle S.J. Dynamic observation of the collapse process of a stacking fault tetrahedron by moving dislocations. *Journal of Nuclear Materials*. 2004, vol. 329–333, pp. 919–923.
 14. Zhao P., Shimomura Y. Molecular dynamics calculations of properties of the self-interstitials in copper and nickel. *Computational Materials Science*. 1999, no. 14, pp. 84–90.
 15. Poletaev G.M., Sannikov A.V., Berdychenko A.A., Starostenkov M.D. Molecular dynamics study of plastic deformation mechanisms near the interphase boundary in two-dimensional bimetallic systems. *Materials Physics and Mechanics*. 2015, vol. 22, no. 1, pp. 15–19.
- Acknowledgements.** The research was financially supported by RFBR within the frameworks of scientific projects no. 13-02-00301_a, no. 14-02-98000-р_сибирь_a, no. 14-08-90416-Укр_a.

Received September 12, 2014

УДК 681.51

КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ С РЕЦИКЛОМ И АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ МОДЕЛЕЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ САР ЭТИХ ОБЪЕКТОВ*

Циряпкина А.В.¹, аспирант кафедры автоматизации и информационных систем (asya1990_90@mail.ru)

Мышляев Л.П.¹, д.т.н., профессор кафедры автоматизации и информационных систем

Ивушкин К.А.², к.э.н., заместитель генерального директора

Грачев В.В.¹, к.т.н., доцент кафедры автоматизации и информационных систем

¹ Сибирский государственный индустриальный университет

(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² ООО «Объединенная компания «Сибшахтострой»

(654034, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, Кузнецкое шоссе, 9)

Аннотация. Работа посвящена управлению объектами с рециклом. Приведена классификация объектов с рециклом с выделением четырех типов: рецикл «по концентрации», «по массе», «по параметрам», «комбинированный». Для первых трех классов объектов представлены структуры систем автоматического регулирования, проведен анализ влияния неопределенности моделей на эффективность работы этих систем. Для объектов с рециклом «по концентрации» проведен анализ системы автоматического регулирования для объекта без самовыравнивания в прямой цепи и с самовыравниванием; для объектов с рециклом «по массе» и «по параметрам» проведен анализ системы автоматического регулирования для объекта без самовыравнивания в прямой цепи. Получены численные оценки зависимостей критерия эффективности от величины соотношения параметров (коэффициент передачи и постоянная времени) модели объекта и объекта управления для всех случаев.

Ключевые слова: объект управления, объект с рециклом, система автоматического регулирования, классификация объектов с рециклом, неопределенность модели.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-925-931

Управлению объектами с рециклом уделяется все больше внимания, так как именно такие объекты в большей мере удовлетворяют современным технологическим, экологическим и экономическим требованиям [1 – 7]. Основная часть работ по этой тематике посвящена только построению систем регулирования одним классом объектов с рециклом – рециклом «по концентрации» – без детального анализа их эффективности [8 – 11]. В работе [12] рассматриваются объекты с рециклом не только «по концентрации», но и «по массе», и предлагаются варианты систем регулирования. В настоящем исследовании дается более полная классификация объектов с рециклом и проводится анализ влияния погрешностей определения коэффициентов моделей объектов на показатели эффективности САР.

В общем виде модель возмущенного движения объекта с рециклом может быть представлена выражениями [13]

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t - \tau_x) + B(t)U(t - \tau_u) + C(t)W(t - \tau_w),$$

$$Y(t) = D(t)Y(t - \tau_y) + F(t)E(t - \tau_e),$$

где X , U , W , Y и E – векторы состояний, управления, внешних воздействий, выходов и погрешностей измерений; τ_x , τ_u , τ_w , τ_y , τ_e – соответствующие времена запаздывания; $A(t)$, $B(t)$, $C(t)$, $D(t)$, $F(t)$ – матрицы соответствующих размерностей; t – непрерывное время.

Для объектов с рециклом предложена классификация, представленная в таблице.

Постановка задачи №1. Анализ влияния неопределенности модели объекта на показатели качества регулирования САР с модельной компенсацией цепи рецикла с самовыравниванием в прямой цепи и без самовыравнивания.

Дано:

1. Структура САР объектом с рециклом «по концентрации» с модельной компенсацией цепи рецикла (рис. 1);
2. Операторы САР

$$\text{а) } \varphi_0(S) = \frac{k_0}{T_0 S + 1}; \quad \varphi_0^M(S) = \frac{k_0^M}{T_0^M S + 1};$$

$$\text{б) } \varphi_0(S) = \frac{k_0}{S}; \quad \varphi_0^M(S) = \frac{k_0^M}{S}; \quad \varphi_r(S) = \frac{k_r}{T_r S + 1};$$

$$\varphi_r^M(S) = \frac{k_r^M}{T_r^M S + 1},$$

* Работа поддержана грантом РФФИ по проекту №15-07-02231.

Классификация объектов с рециклом

Classification of objects with recycle

Класс объекта с рециклом	Структура модели объекта
1. Объекты с рециклом «по концентрации» [13], когда все расходы материала фиксированы, а концентрация элементов, температура материала и др. изменяется. В этом случае матрица $A(t)$ не зависит от состояния $X(t)$, и $D(t) = 1$.	
2. Объекты с рециклом «по массе», когда за выходное воздействие принимается часть материала (готовой продукции), поступающей на выход объекта, а другая часть материала поступает в цепь рецикла. Соотношение этих частей может изменяться в зависимости от внешних условий, состояний, агрегатов и т.д. и, как правило, специально не контролируется. В этом случае матрица $A(t)$ не зависит от состояния $X(t)$, и $D(t) \neq 1$.	
3. Объекты, в которых рецикл влияет на параметры отдельных их составляющих – рецикл «по параметрам». В этом случае матрицы $B(t)$ и $C(t)$ зависят от состояния $X(t)$.	
4. Комбинированные объекты с рециклом, объединяющие первые три класса.	

где $k_0, k_r, T_0, T_r, k_0^M, k_r^M, T_0^M, T_r^M$ – коэффициенты передачи натурального объекта, постоянные времени натурального объекта, коэффициенты передачи модели, постоянные времени модели соответственно; $f_r(S) = \left(k_p + \frac{1}{T_i S} \right)$ – пропорционально-интегральный закон регулирования [11]; $f_s(S)$ – оператор «сдвигки»;

3. Вариации отношений $\frac{k_0}{k_0^M}, \frac{k_r}{k_r^M}, \frac{T_0}{T_0^M}, \frac{T_r}{T_r^M}$ в диапазоне [0,8; 1,2];

4. Критерий эффективности САР:

$$q(T) = \frac{1}{T} \int_0^{t+T} |y^*(\theta) - y(\theta)| d\theta,$$

где T – время переходного процесса.

Требуется: оценить влияние изменения значений отношений $\frac{k_0}{k_0^M}, \frac{k_r}{k_r^M}, \frac{T_0}{T_0^M}, \frac{T_r}{T_r^M}$ на эффективность работы САР объектов с рециклом «по концентрации» для объектов с самовыравниванием и без самовыравнивания в прямой цепи¹.

Переход от операторов $\Phi_0, \Phi_r, \Phi_{\tau_u}, \Phi_{\tau_0}, \Phi_{\tau_r}$ к рекуррентно-разностной форме сделан методом конечных разностей. Программирование осуществлено в системе Microsoft Office Excel.

¹ Не рассматривается изменение соотношений времен запаздываний в прямой цепи и цепи рецикла.

Результаты численных исследований САР для объекта с самовыравниванием в прямой цепи в виде графиков зависимостей критерия эффективности Q от соотношений параметров представлены на рис. 2, а, для объекта без самовыравнивания – на рис. 2, б.

Постановка задачи № 2. Анализ влияния неопределенности модели объекта на показатели качества регулирования САР объектов с рециклом «по массе».

Дано:

1. Структура САР объектом с рециклом «по массе» (рис. 3) [14];

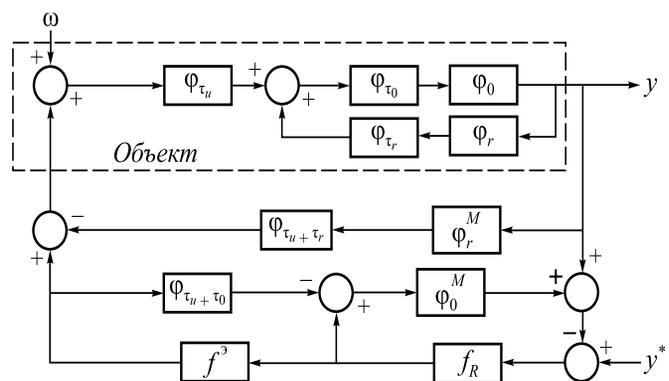


Рис. 1. САР объекта с рециклом «по концентрации»

Fig. 1. ACS of recycle objects “by concentration”

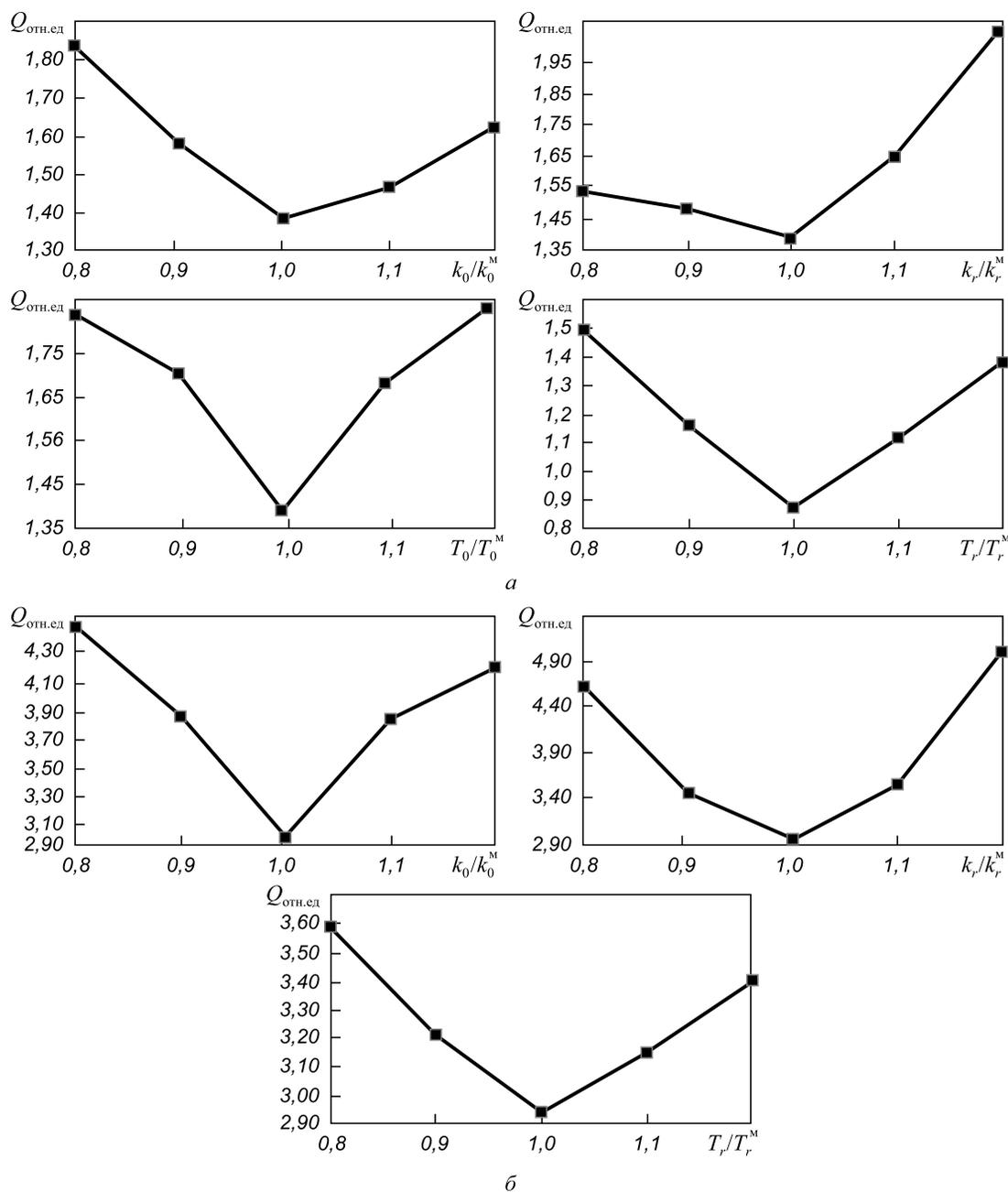


Рис. 2. Зависимость критерия Q от соотношений параметров модели и объекта управления САР объекта: a – с самовыравниванием в прямой цепи; b – без самовыравнивания

Fig. 2. Dependence of Q criteria on parameters ratio of the model and the control objects of ACS of the object: a – with self-regulation in a straight chain; b – without self-regulation

2. Операторы САР – те же, что для постановки задачи № 1 (только a);

3. Значение блока деления объекта управления: $\alpha(i) = 0,7$;

4. Вариации соотношений $\frac{k_0}{k_0^M}, \frac{k_r}{k_r^M}, \frac{T_0}{T_0^M}, \frac{T_r}{T_r^M}$ в диапазоне $[0,8; 1,2]$;

5. Критерий эффективности САР:

$$q(T) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} |y^*(\theta) - y(\theta)| d\theta,$$

Требуется: оценить влияние изменения значений соотношений $\frac{k_0}{k_0^M}, \frac{k_r}{k_r^M}, \frac{T_0}{T_0^M}, \frac{T_r}{T_r^M}$ на эффективность работы САР объектов с рециклом «по массе» для объектов с самовыравниванием в прямой цепи.

Численное моделирование осуществлялось при тех же условиях, что и в предыдущей задаче. Результаты численных исследований САР объекта с рециклом «по массе» в виде графиков зависимостей критерия эффективности Q от соотношений параметров представлены на рис. 4.

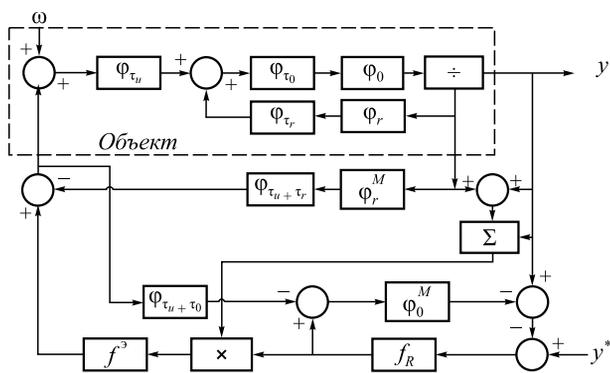


Рис. 3. САР объекта с рециклом «по массе»

Fig. 3. ACS of the recycle object “by the weight”

Постановка задачи № 3. Анализ влияния неопределенности модели объекта на показатели качества регулирования САР объектов с рециклом «по параметрам».

Дано:

1. Структура САР объектом с рециклом «по параметрам» (рис. 5) [15];
2. Операторы САР – такие же, что и при постановке задачи № 2;
3. Вариации отношений $\frac{k_0}{k_0^M}, \frac{k_r}{k_r^M}, \frac{T_0}{T_0^M}, \frac{T_r}{T_r^M}$ в диапазоне [0,8; 1,2];
4. Критерий эффективности САР:

$$q(T) = \frac{1}{T} \int_0^T |y^*(\theta) - y(\theta)| d\theta.$$

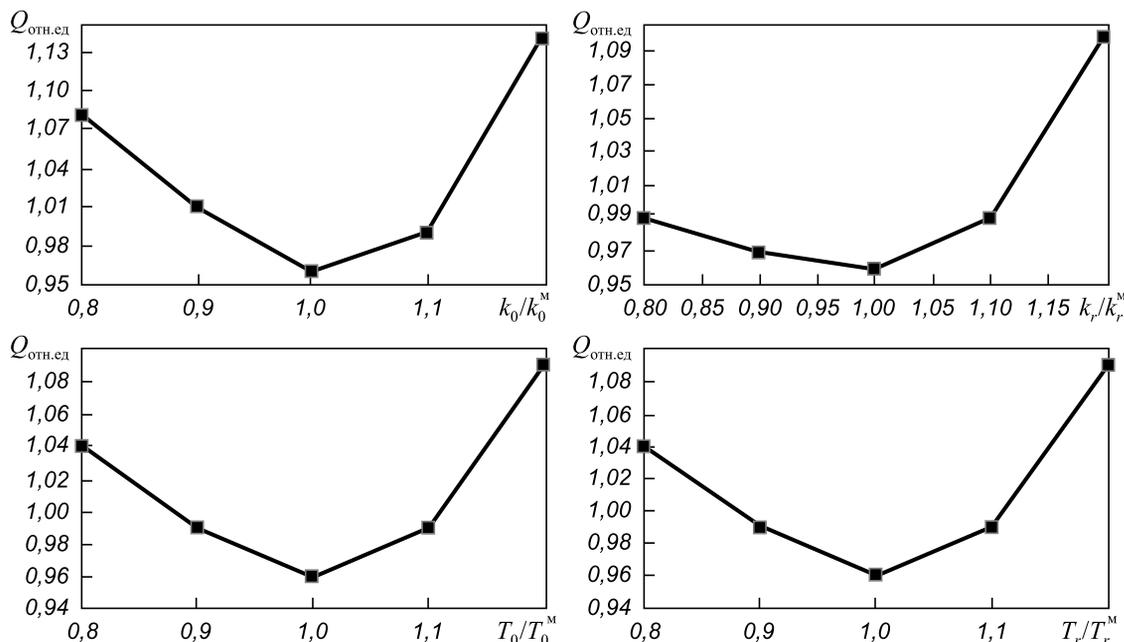


Рис. 4. Зависимость критерия эффективности Q от соотношений параметров модели и объекта управления САР объекта с рециклом «по массе»

Требуется: оценить влияние изменения значений отношений $\frac{k_0}{k_0^M}, \frac{k_r}{k_r^M}, \frac{T_0}{T_0^M}, \frac{T_r}{T_r^M}$ на эффективность работы

САР объектов с рециклом «по параметрам» для объектов с самовывравниванием в прямой цепи.

Численное моделирование осуществлялось при тех же условиях, что и в предыдущих задачах. Результаты численных исследований САР объекта с рециклом «по параметрам» в виде графиков зависимостей критерия эффективности Q от соотношений параметров представлены на рис. 6.

Выводы. САР объекта с рециклом «по концентрации», «по массе» и «по параметрам» устойчивы при любых отношениях $\frac{k_0}{k_0^M}, \frac{k_r}{k_r^M}, \frac{T_0}{T_0^M}, \frac{T_r}{T_r^M}$; наилучший показатель эффективности работы САР достигается при значениях этих отношений, равных единице, т.е. в том случае, когда модель объекта адекватна объекту управления. Полученные результаты можно использовать при уточнении настроечных коэффициентов регулирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Утеуш Э.В., Утеуш З.В. Управление измельчительными агрегатами. – М.: Машиностроение, 1973. – 280 с.
2. Амелин А.Г., Яшке Е.В. Производство серной кислоты. – М.: Высшая школа, 1980. – 245 с.
3. Хайниш С.В. Об оптимальном управлении объектами с замкнутым циклом: Сб. «Управление сложными системами». – М.: ИАТ, 1974. С. 42 – 55.
4. Нагиев М.Ф. Теоретические основы рециркуляционных процессов в химии. – М.: Наука, 1962. – 322 с.

Fig. 4. Dependence of efficiency criterion Q on parameters ration of the model and the control object of ACS of the recycle object “by the weight”

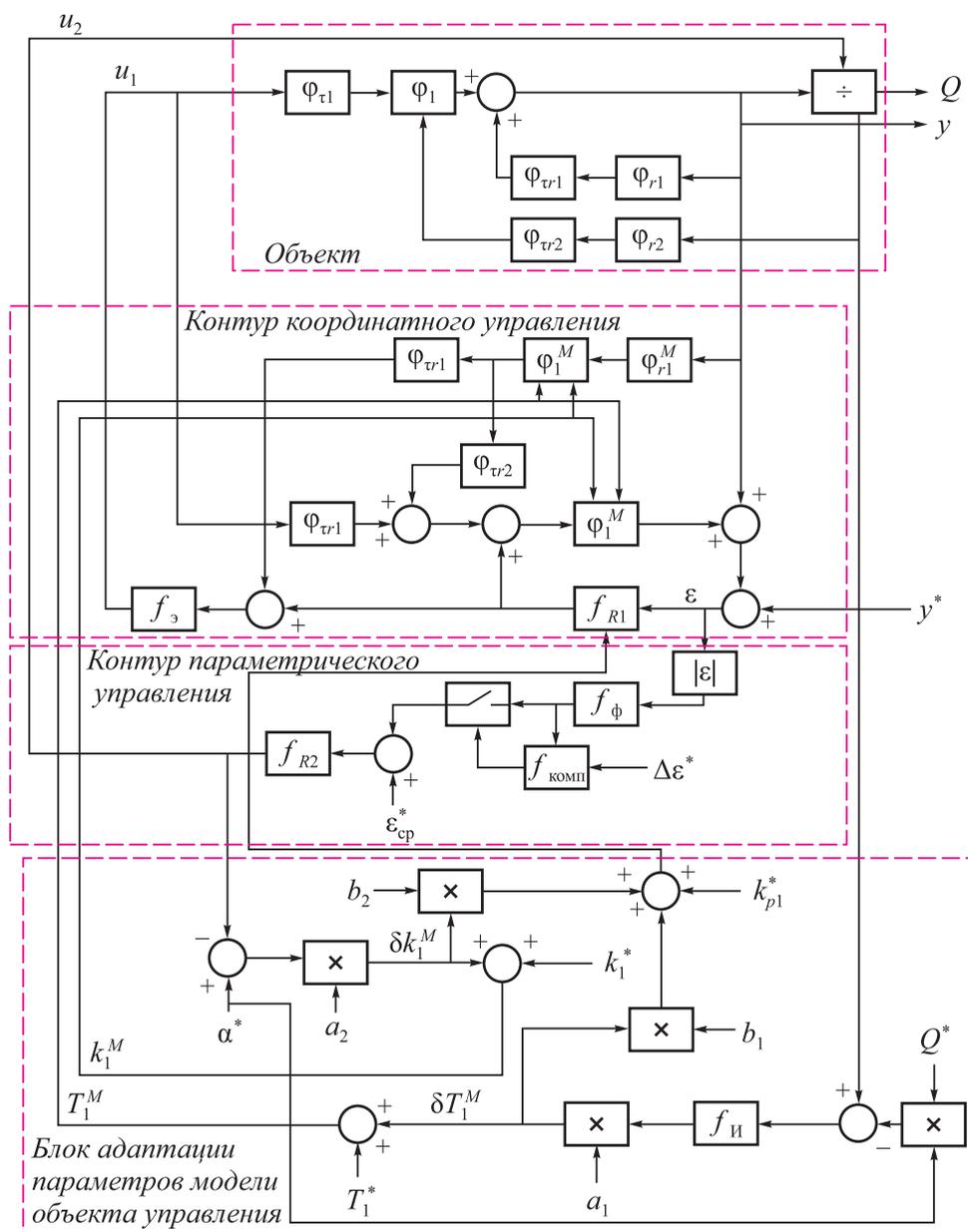


Рис. 5. САР объекта с рециклом «по параметрам»:

f_{r1} и f_{r2} – первый и второй регулирующий блоки; f_3 – блок экстраполяции; f_{ϕ} – блок фильтрации; $f_{\text{и}}$ – интегратор; $f_{\text{комп}}$ – компаратор; $|\varepsilon|$ – блок расчета модуля ошибки регулирования; \times – блок умножения; Q – выходные воздействия (расход готового продукта, поступающего на выход объекта управления); Q^* – базовая величина расхода готового продукта; α^* , k_1^* , T_1^* , k_{p1}^* – базовые значения параметров системы; a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , – задаваемые константы, рассчитываемые исходя из параметров конкретного технологического объекта

Fig. 5. ACS of the recycle object “by the parameters”:

f_{r1} and f_{r2} – the first and the second controlling blocks; f_3 – extrapolation block; f_{ϕ} – filtration block; $f_{\text{и}}$ – integrator; $f_{\text{комп}}$ – comparator; $|\varepsilon|$ – calculation block of control error module; \times – multiplication block; Q – output actions (end product consumption, going into the withdrawal of the control object); Q^* – baseline flow rate value of the end product; α^* , k_1^* , T_1^* , k_{p1}^* – baseline values of system parameters; a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , – the driven constants, calculated in terms of the parameters of the concrete technological object

- Янушевский Р.Т. Управление объектами с запаздыванием. – М: Наука, 1978. – 416 с.
- Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М.: Машиностроение, 1974. – 328 с.
- Системы автоматизации на основе натурно-модельного подхода В 3-х т. Т. 2: Системы автоматизации производственного назначения / Л.П. Мышляев, А.А. Ивушкин, Г.П. Сазыкин и др.; Под ред. Л.П. Мышляева. – Новосибирск: Наука, 2006. – 483 с.
- Дылевский А.В., Лозгачев Г.И. Построение регулятора для объекта с распределенными параметрами по передаточной функции замкнутой системы // Вестник ВГУ. Серия физика, математика. 2004. № 2. С. 154 – 157.
- Дылевский А.В., Лозгачев Г.И., Малютина В.С. Синтез модального регулятора для объекта с распределенными параметрами // Вестник ВГУ. 2007. № 1. С. 128 – 132.
- Li Yi, Ko King-Tim. Chen Guanrong A Smith predictor based PI-controller for active queue management / IEICE Transactions on communications // Oxford University Press. 2005. № 11. P. 42 – 93.

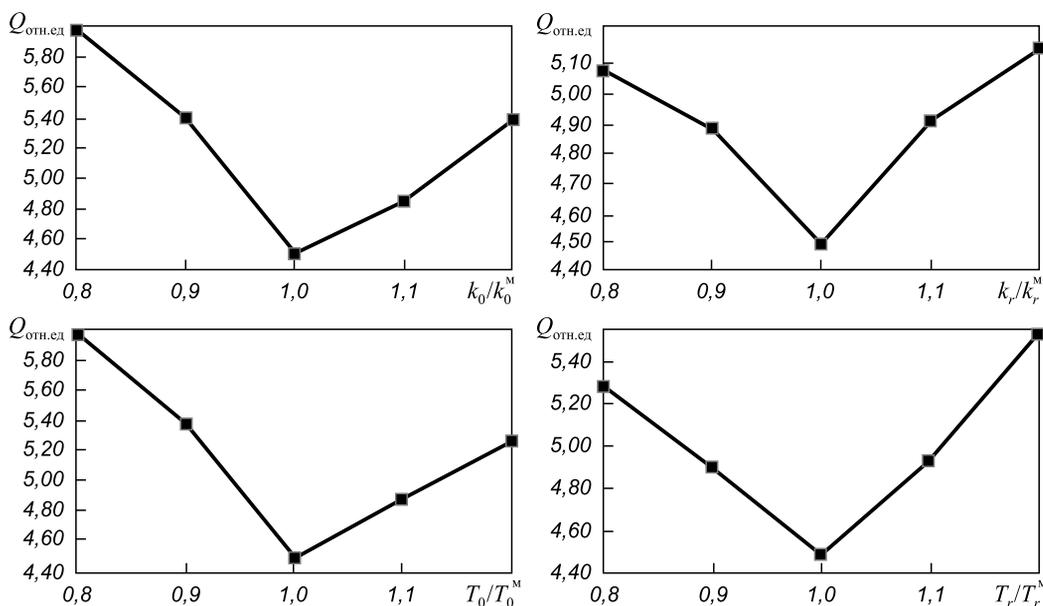


Рис. 6. Зависимость критерия эффективности Q от соотношений параметров модели и объекта управления САР объекта с рециклом «по параметрам»

Fig. 6. Dependence of efficiency criterion Q on parameters ration of the model and the control object of ACS of the recycle object “by the parameters”

11. Еремин Е.Л., Леянов Б.Н., Шеленок Е.А. Дискретные алгоритмы робастного управления нелинейно-нестационарным объектом в периодических режимах // Вестник ТОГУ. 2010. № 1 (16). С. 45 – 54.
12. Мышляев Л.П., Циряпкина А.В., Ивушкин К.А., Киселев С.Ф. Управление объектов с рециклом // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. Т. 58, № 5. С. 381 – 385
13. Рей У. Методы управления технологическими процессами. – М.: Мир, 1983. – 368 с.
14. Мышляев Л.П., Ивушкин А.А., Венгер К.Г. и др. Система регулирования объекта с рециклом // Бюл. евразийского патентного ведомства 021192 В1, № 2011130360/08 G05B13/00.
15. Пат. 2542910 РФ. Система регулирования объекта с рециклом / Л.П. Мышляев, А.А. Ивушкин, К.А. Ивушкин, С.Ф. Киселев, А.В. Циряпкина; заявл. 19.03.2014; опубл. 27.02.2015. Бюл. № 6.

Поступила 5 октября 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 12, pp. 925–931.

CLASSIFICATION OF OBJECTS WITH RECYCLE AND IMPACT ANALYSIS OF MODELS UNCERTAINTY ON EFFECTIVE MANAGEMENT SYSTEMS OF THESE OBJECTS

*A.V. Tsiryapkina*¹, Postgraduate, Junior Researcher of the Chair “Automation and Information Systems” (asya1990_90@mail.ru)

*L.P. Myshlyayev*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Automation and Information Systems”

*K.A. Ivushkin*², Cand. Sci. (Econ.), Deputy General Director

*V.V. Grachev*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Automation and Information Systems”

¹Siberian State Industrial University (42, Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

²LLC United Company “Sibshahtostroy” (9, Kuznetskoe route, Novokuznetsk, Kemerovo Region, 650341, Russia)

Abstract. The work is dedicated to the recycle object control. There is a classification of recycle objects with the release of four types: recycle “by the concentration”, “by the weight”, “by the parameters”, as well as “the combined recycle”. For the first three classes of objects the structure of automatic control systems was presented, the analysis of

the impact of uncertainty on the performance of the models of these systems was carried out. For recycle objects “by the concentration” the analysis of the automatic control system was done for an object without self-leveling in a straight chain with self-leveling; for the recycle objects “by the weight” and “by the parameters” the analysis of the automatic control system was carried out for an object without self-leveling in a straight chain. Numerical evaluation criterion of efficiency dependencies on the magnitude of the ratio parameters (gain and time constant) model of the object and the object of control for all occasions were received.

Keywords: control object, recycle object, automatic control system, classification of recycle objects, model uncertainty.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-12-925-931

REFERENCES

1. Uteush E.V., Uteush Z.V. *Upravlenie izmel'chitel'nymi agregatami* [Control of chopping cutter]. Moscow: Mashinostroenie, 1973, 280 p. (In Russ.).
2. Amelin A.G., Yashke E.V. *Proizvodstvo sernoi kisloty* [Production of sulfuric acid]. Moscow: Vysshaya shkola, 1980, 245 p. (In Russ.).

3. Khainish S.V. On the optimal control of the objects with closed cycle. In: *Sb. Upravlenie slozhnymi sistemami* [In: Control of complex systems]. Moscow: IAT, 1974, pp. 42–55. (In Russ.).
4. Nagiev M.F. *Teoreticheskie osnovy retsirkulyatsionnykh protsessov v khimii* [Theoretical basis of the recirculation processes in chemistry]. Moscow: Nauka, 1962, 322 p. (In Russ.).
5. Yanushevskii R.T. *Upravlenie ob"ektami s zapazdyvaniem* [Control of the objects with lagging]. Moscow: Nauka, 1978, 416 p. (In Russ.).
6. Gorecki Henryk. *Analiza i syntesa ukladow regulacji z opoznieniem*. Warszawa: Wydaw. Naukowo-Techniczne, 1971. (Russ.ed.: Gorecki H. *Analiz i sintez sistem upravljeniya s zapazdyvaniem*. Trans. from Pol. Moscow: Mashinostroenie, 1974, 328 p.).
7. Myshlyayev L.P., Ivushkin A.A., Sazykin G.P. *Sistemy avtomatizatsii na osnove naturno-model'nogo podkhoda v 3-kh t. T. 2: Sistemy avtomatizatsii proizvodstvennogo naznacheniya* [Automated systems based on natural-model approaches in three volumes. vol. 2: Commercial automated systems]. Novosibirsk: Nauka, 2006, 483 p. (In Russ.).
8. Dylevskii A.V., Lozgachev G.I. Construction of the regulator for the objects with the dispersed parameters by the transfer function of the closed system. *Vestnik VGU. Seriya fizika, matematika*. 2004, no. 2, pp. 154–157. (In Russ.).
9. Dylevskii A.V., Lozgachev G.I., Malyutina V.S. Synthesis of the modal regulator for the object with the dispersed parameters. *Vestnik VGU*. 2007, no. 1, pp. 128–132. (In Russ.).
10. Li Yi, Ko King-Tim. Chen Guanrong A Smith predictor based PI-controller for active queue management. *IEICE Transactions on communications*. Oxford University Press. 2005, no. 11, pp. 42–93.
11. Eremin E.L., Lelyanov B.N., Shelenok E.A. Discrete algorithms of robust control with nonlinear-unsteady objects in periodic modes. *Vestnik TOGU*. 2010, no. 1 (16), pp. 45–54. (In Russ.).
12. Myshlyayev L.P., Tsiryapkina A.V., Ivushkin K.A., Kiselev S.F. Management of objects with recycle. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015. vol. 58, no. 5, pp. 381–385. (In Russ.).
13. Ray W. Harmon. *Advanced process control*. McGraw-Hill, New York etc. 1981, 326 p. (Russ.ed.: Ray W. *Metody upravljeniya tekhnologicheskimi protsessami*. Moscow: Mir, 1983. 368 p.).
14. Myshlyayev L.P., Ivushkin A.A., Venger K.G., Kiselev S.F., Tsiryapkina A.V., Berezin D.G., Chichindaev M.G. Baragichev K.E. *Sistema regulirovaniya ob"ekta s retsiklom* [Control system of recycle objects]. *Byulleten' evraziiskogo patentnogo vedomstva* 021192 V1, no. 2011130360/08 G05B13/00.
15. Myshlyayev L.P., Ivushkin A.A., Ivushkin K.A., Kiselev S.F., Tsiryapkina A.V. *Sistema regulirovaniya ob"ekta s retsiklom* [Control system of recycle objects]. Patent RF no. 2542910, *Byulleten' izobretenii*. 2015, no. 6.

Acknowledgements. The work was supported by the grant of RFBR according to the project no. 15-07.02231.

Received October 5, 2015

К 70 -ЛЕТИЮ АЛЕКСАНДРА МАРКОВИЧА ГЛЕЗЕРА



26 января 2016 г. исполняется 70 лет Александру Марковичу Глезеру, доктору физико-математических наук, профессору – крупному ученому и лидеру научной школы в области изучения и разработки многофункциональных материалов нового поколения. Под его руководством выполнен ряд фундаментальных и прикладных исследований нанокристаллических и аморфных функциональных материалов. Он является ведущим ученым России в области материалов, полученных методами закалки из расплава и интенсивной пластической деформации. Он также известен как ведущий ученый в области применения электронно-микроскопических методов для исследования структуры конденсированного состояния.

Им впервые обнаружены необычные эффекты структурно-фазовых превращений, связанные с высокой степенью пересыщения материалов избыточными вакансиями, формирующимися при закалке из расплава. Им впервые обнаружен и детально проанализирован размерный эффект при мартенситном превращении в нанокристаллах. А.М. Глезеру принадлежит новый

оригинальный подход, позволивший понять природу структурно-фазовых превращений, происходящих при интенсивной пластической деформации.

А.М. Глезером установлены способы и конкретные режимы кардинального повышения магнитных, прочностных и пластических свойств модельных и промышленных функциональных материалов на основе железа, никеля и кобальта, в основе которых лежат методы получения нанокристаллических структур с помощью закалки из расплава в сочетании с интенсивной пластической деформацией.

А.М. Глезер более 20 лет руководит Институтом металловедения и физики металлов им. академика Г.В. Курдюмова – одним из авторитетнейших институтов России в области материаловедения. А.М. Глезер – лауреат Премии РАН имени П.П. Аносова (2011 г.) за выдающиеся научные работы в области металлургии, металловедения и термической обработки металлов и сплавов.

А.М. Глезер – главный редактор журнала «Деформация и разрушение материалов», который входит в список ВАК и переводится на английский язык издательством «Шпрингер», заместитель главного редактора журнала «Материаловедение», член редколлегий журналов «Известия РАН. Серия физическая», «Journal of Material Science & Technology», «Наноструктурное материаловедение», «Фундаментальные проблемы современного материаловедения» и «Проблемы черной металлургии и материаловедения».

А.М. Глезер входит в состав Научных Советов РАН по физике конденсированных сред, наноматериалам, металловедению и металлургии. Он также является одним из руководителей Межгосударственного Координационного Совета по физике прочности и пластичности материалов.

Редакционная коллегия журнала «Известия вузов. Черная металлургия», друзья, ученики и коллеги сердечно поздравляют А.М. Глезера с юбилеем и желают ему здоровья и новых научных успехов на благо нашей Родины.

Указатель статей, помещенных в журнале «Известия высших учебных заведений. Черная металлургия» за 2015 год

ВЫСОКОПРОЧНЫЕ СТАЛИ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ

- Лейс Брайан Н. Приостановление распространения деформации в магистральном трубопроводе (англ.) 1
- Лейс Брайан Н. Приостановление распространения деформации в магистральном трубопроводе. Сообщение 2. (англ.) 3

РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

- Бердников В.И., Гудим Ю.А. Условия образования диоксинов при высокотемпературном сжигании хлорсодержащих материалов 2
- Зоря В.Н., Коровушкин В.В., Пермяков А.А., Волюшкина Е.П. Исследование минерального состава и кристаллической структуры железосодержащих компонентов техногенных отходов металлургического комплекса 5
- Кузнецов С.Н., Волюшкина Е.П., Протопопов Е.В. Высокотемпературные металлургические агрегаты – эффективные утилизаторы опасных органических отходов 5
- Павлович Л.Б., Коротков С.Г., Осокина А.А. Оценка экологического риска от производственной деятельности металлургического комбината 12

РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

- Боташев А.Ю., Бисилов Н.У., Малсугенов Р.С. Разработка и исследование нового метода листовой штамповки 1
- Герцык С.И., Туктаров Д.Б. Зависимость концентрации оксидов азота в уходящих газах от способа формирования топливозоудушной смеси 3
- Гуревич Ю.Г. Кинетика пропитки неспеченного карбидного каркаса коррозионностойкой сталью X18H10T 1
- Гурьянов Г.Н., Железков О.С., Платов С.И., Терентьев Д.В. Запас прочности и эффективность формоизменения проволоки в зависимости от угла волочения 1
- Лисненко В.Г., Лаптева А.В., Чесноков Ю.Н., Луговкин В.В. Сравнительная эмиссия парникового газа CO₂ в пределах черной металлургии 9
- Козырев Н.А., Протопопов Е.В., Уманский А.А., Бойков Д.В. Совершенствование технологии раскисления и внепечной обработки рельсовой электростали с целью повышения качества рельсового проката 10
- Орелкина О.А., Петелин А.Л., Полулях Л.А. Анализ пространственного распределения вторичных газовых выбросов во внешней зоне влияния предприятий черной металлургии 11
- Подгородецкий Г.С., Юсфин Ю.С., Сажин А.Ю., Горбунов В.Б., Полулях Л.А. Современные тенденции развития технологии производства генераторных газов из различных видов твердого топлива 6
- Ярошенко Ю.Г., Липунов Ю.И., Захарченко М.В., Эйсмундт К.Ю., Некрасова Е.В. Разработка нового способа термического упрочнения для решения экологических задач металлургического производства 4
- Темлянец М.В., Коноз К.С., Дзюба А.Ю., Уманский А.А., Темлянец Н.В. Разработка металлосберегающих режимов нагрева в методических печах непрерывнолитых заготовок стали марки 60С2ХА 8

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В. Термодинамическое моделирование взаимодействия техногенного микрокремнезема с буроголистым полукоксом 4
- Базайкин В.И., Темлянец М.В., Базайкина О.Л. Влияние термических напряжений на формирование зоны пластического течения в начале горячейковки цилиндрической заготовки 4

- Базайкин В.И., Темлянец М.В., Бобров Б.Ю. Напряжения начала протяжки цилиндрической заготовки при горячейковке в комбинированных бойках 2
- Басов А.В., Магидсон И.А., Смирнов Н.А. Плотность и электропроводность некоторых синтетических шлаков для обработки стали в агрегате ковш-печь 11
- Беломытцев М.Ю., Мордашов С.В. Закономерности кратковременной ползучести стали Ст3 11
- Бердников В.И., Гудим Ю.А. Трехпараметрическая модель субрегулярных растворов 4
- Богатов А.А., Салихьянов Д.Р. Исследование точности внутреннего диаметра горячекатаных труб при раздаче 1
- Боровых М.А., Вьюхин В.В., Чикова О.А., Цепелев В.С. О влиянии дефектов на вязкость жидких сталей 32Г1 и 32Г2 6
- Боровых М.А., Чикова О.А., Цепелев В.С., Вьюхин В.В. Об оптимальном режиме температурно-временной обработки жидких сталей 32Г1 и 32Г2 3
- Бурмасов С.П., Гудов А.Г., Ярошенко Ю.Г., Мелинг В.В., Дресвянкин Л.Е. Анализ массообменных процессов при ковшевом рафинировании стали в условиях газового перемешивания 9
- Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Синицкий Е.В., Горленко Д.А., Дуров Н.А. Выплавка высокомарганцовистой стали в дуговой сталеплавильной печи. Технология. Сообщение 1 10
- Воронов Г.В., Гольцев В.А., Глухов И.В. Особенности аэродинамики и температурного поля в рабочем пространстве современной дуговой сталеплавильной печи 9
- Галевский Г.В., Руднева В.В., Гарбузова А.К. Металломатричные защитные покрытия с наноконпонентами: формирование, свойства, применение 5
- Герасимова А.А., Радюк А.Г., Титлянов А.Е. Создание диффузионного слоя на узких стенках кристаллизаторов МНЛЗ с использованием алюминиевого газотермического покрытия 3
- Гордон Я.М., Кумар С., Фрейслич М., Ярошенко Ю.Г. Современные технологии производства железа и стали и возможные пути их развития 9
- Зацепин Е.П., Галкин А.В. Моделирование распределения электромагнитного поля в слое рафинировочного шлака в агрегатах печь-ковш 7
- Зенкин Р.Н., Зенкин Н.Н., Вальтер А.И. Разработка пробного сухопутного стенда для артиллерийских установок АК-230 и АК-230м из высокопрочного чугуна 7
- Ильинский А.И., Ливаткин П.А., Положенцев К.А. Анализ продукции, полученной в результате внедрения новой автоматизированной системы управления вакуумным дуговым переплавом 11
- Калиногорский А.Н., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Фейлер С.В., Багрянец В.И. Исследование особенностей применения вихревых технологий для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров. Сообщение 1. Особенности дробления жидкого шлака при раздувке вихревой фурмой 10
- Калиногорский А.Н., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Фейлер С.В., Багрянец В.И. Исследование особенностей применения вихревых технологий для нанесения огнеупорных покрытий на футеровку конвертеров. Сообщение 2. Характеристики и параметры движения капель шлака 12
- Козырев Н.А., Шурупов В.М., Кушнаренко Н.Н., Козырева О.Е., Титов Д.А. Исследование возможности использования вольфрамсодержащих руд и их производных при наплавке стали 8
- Конашков В.В., Цепелев В.С., Чикова О.А., Белоносов А.В. Связь механических свойств литых изделий из стали 40Х24Н12СЛ с их микроструктурой и вязкостью расплава 3
- Лобанов М.Л. Особенности азотирования технического сплава Fe – 3 % Si 2
- Максимов А.Б., Гуляев М.В. Распределение деформации по толщине широкого бруса при циклическом пластическом изгибе 7

Мальшева Т.Я., Павлов Р.М., Мансурова Н.Р., Деткова Т.В. Влияние природного рудообразования на минеральный состав и холодную прочность офлюсованных железорудных агломератов 3	щей способности барий-стронциевого карбоната БСК-2 при изготовлении чугуна 10	
Матюхин В.И., Меламуд С.Г., Шацкило В.В., Матюхин О.В., Матюхина А.В. Исследование особенностей обжига мелких фракций сидерита во вращающейся печи 9	Филатов С.В., Загайнов С.А., Гилева Л.Ю., Пыхтеева К.Б. Разработка методики анализа процессов восстановления оксидов железа 9	
Меламуд С.Г., Юрьев Б.П. Методика расчета напряжений в обожженных железорудных окатышах при их охлаждении 12	Харлашин П.С., Куземко Р.Д., Протопопов Е.В., Фейлер С.В., Харин А.К. Моделирование присоединения шлака к сверхзвуковой струе при его раздувке в полости конвертера 2	
Михайлов Г.Г., Макровец Л.А., Смирнов Л.А. Термодинамическое моделирование процессов взаимодействия лантана с компонентами металлических расплавов на основе железа 12	Цымбал В.П., Кожемяченко В.И., Рыбенко И.А., Падалко А.Г., Оленников А.А. Использование принципов самоорганизации и диссипативных структур при создании нового струйно-эмульсионного металлургического процесса 8	
Мухин Ю.А., Бельский С.М., Чупров В.Б., Бахаев К.В., Стоякин А.О. Особенности температурного поля стальных полос при горячей прокатке 6	Шевченко Е.А., Столяров А.М., Шаповалов А.Н., Баранчиков К.В. О рациональной длине поддерживающей системы узких граней непрерывнолитой заготовки для предотвращения выпуклости 1	
Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Голодова М.А., Осипова Ю.А. Термодинамическое моделирование процесса обработки стали конвертерным ванадиевым шлаком при продувке азотом 8	Юсфин Ю.С., Мальшева Т.Я. Влияние структурных особенностей кристаллов магнетита на процесс спекания агломератов 7	
Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Прошунин И.Е., Ходосов И.Е. Обогащение полиметаллических марганецсодержащих руд и рациональное использование полученных концентратов 5	Якубайлик Э.К., Балаев А.Д., Гайженко И.М., Бутов П.Ю. Корреляция магнитных свойств и содержания железа в продуктах мокрой магнитной сепарации 10	
Павловец В.М. Исследование термостойкости железорудных окатышей, полученных при использовании теплосилового напыления влажной шихты 2	Якушевич Н.Ф., Полях О.А., Галевский Г.В. Термодинамические равновесия в системе кремнистый сплав – шлак – газ 12	
Перетягко В.Н., Сметанин С.В., Филиппова М.В. Новая технология прокатки трамвайных желобчатых рельсов 5	Якушевич Н.Ф., Полях О.А., Галевский Г.В., Тяжина А.А. Анализ фазово-химических равновесий в системе расплав (Fe–Si–C) – шлак (CaO–Al ₂ O ₃ –SiO ₂) – газ (O ₂ –SiO–CO) 5	
Поводатор А.М., Цепелев В.С., Конашков В.В. Экспресс-измерение декремента затухания при фотометрическом определении вязкости высокотемпературных металлических сплавов 6	Ячиков И.М., Костылева Е.М. Поведение основных электромагнитных сил, действующих на дугу в трехфазной дуговой печи 7	
Полубояров В.А., Коротаева З.А., Жданок А.А., Кузнецов В.А., Самохин А.В. Внутриформенное модифицирование чугунов. Исследование влияния модификаторов, полученных плазмохимическим и СВЧ методами, на эксплуатационные характеристики серого чугуна. Сообщение 2 8	ИНЖИНИРИНГ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ	
Полубояров В.А., Коротаева З.А., Жданок А.А., Кузнецов В.А., Самохин А.В. Внутриформенное модифицирование чугунов. Влияние состава и концентрации наноразмерных модификаторов на эксплуатационные характеристики серого чугуна. Сообщение 3 10	Антощенко Ю.М., Таупек И.М. Исследование процесса осесимметричной осадки методами компьютерного моделирования 1	
Постольник Ю.С., Тимошпольский В.И., Трусова И.А. Аналитические расчеты режимов затвердевания и охлаждения крупнотоннажных промышленных слитков. Сообщение 1. Математическая постановка задачи и вывод расчетных соотношений для схемы термического слоя 8	Богатов А.А., Нухов Д.Ш. Конечно-элементное моделирование кузнечной протяжки полос без изменения формы и размеров в условиях знакопеременной деформации 6	
Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Фейлер С.В. Вклад кафедры металлургии черных металлов в развитие теории и техники высокотемпературного моделирования продувки конвертерной ванны 5	Бородина М.Б., Мироненко С.В. К расчету параметров гидромеханических муфт с дифференциальным планетарным передаточным механизмом 7	
Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Фейлер С.В., Вакульчук В.В., Сокол А.Н. Исследование особенностей формирования металлошлаковых настывлей на двухъярусных кислородных фурмах при продувке конвертерной ванны 4	Драгобецкий В.В., Шаповал А.А., Загорянский В.Г. Разработка элементов средств индивидуальной защиты нового поколения на основе слоистых металлических композиций 1	
Рожихина И.Д., Нохрина О.И., Дмитриенко В.И., Платонов М.А. Модифицирование стали барием и стронцием 12	Зайнуллин Л.А., Калганов М.В., Калганов Д.В., Ярчук В.Ф. Исследование эффективности охлаждения вращающегося вала печного высокотемпературного вентилятора 9	
Ри Хосен, Дзюба Г.С., Ри Э.Х., Ермаков М.А., Мамонтова Е.С. Управление структурой и свойствами хромистых белых чугунов путем их модифицирования 6	Зубарев К.А., Котельников Г.И., Лопатенко А.Д., Семин А.Е. Расчет изменения состава сплавов на основе железа при плавке в вакуумной индукционной печи 11	
Сторожев Ю.И., Подборский Л.Н., Худяков И.А. Металлизация формованных рудно-угольных материалов в кольцевой печи 4	Казяев М.Д., Вохмяков А.В., Киселев Е.В., Спитченко Д.И. Методика и результаты исследования сложного внешнего теплообмена в вертикальной камерной печи для термообработки длинномерных изделий 9	
Темлянец М.В., Филиппова М.В., Перетягко В.Н. Горячая пластическая деформация стали марки 08X21H5T 10	Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Роор А.В., Башенко Л.П., Липатова У.И. Исследование и разработка новых углеродфторсодержащих добавок для сварочных флюсов 4	
Токовой О.К., Шабуров Д.В. Исследование неметаллических включений в вакуумированной аустенитной нержавеющей стали методом растровой электронной микроскопии 12	Кулаков С.М., Мусатова А.И., Кадыков В.Н., Баранов П.П. Применение тактовых моделей в задачах реинжиниринга производственных систем в металлургии 5	
Фастыковский Р.А., Уманский А.А. Теория и практика ресурсосберегающих технологий производства сортового проката на действующих непрерывных станах 5	Логинов Ю.Н., Бабайлов Н.А., Первухина Д.Н. Физическое моделирование валкового прессования при несимметричном воздействии на уплотняемый материал 3	
Селянин И.Ф., Феоктистов А.В., Деев В.Б., Модзелевская О.Г., Куценко А.А. Физико-химический анализ модифицирую-	Полушин Н.И., Лаптев А.И., Поздняков А.А. Разработка камеры высокого давления для проведения длительного эксперимента при высоких давлениях и температурах в области стабильности алмаза 11	
	Савельев А.Н., Кипервассер М.В., Анканов Д.С. Диагностика аварийных режимов ленточных транспортеров в горно-металлургической промышленности 12	
	Ярошенко Ю.Г., Швыдкий В.С., Спирин Н.А., Лавров В.В., Носков В.Ю. Нестационарный теплообмен в зоне расплава и особенности переходных процессов в доменной печи 9	

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

Алеутдинова М.И., Фадин В.В. О влиянии наклепа на износ стали Ст3 в скользящем сухом контакте при высокой плотности тока	6
Афонин А.Н., Ларин А.И., Макаров А.В. Гетерогенное упрочнение деталей горно-металлургических машин поверхностным пластическим деформированием	11
Багмутов В.П., Водополян В.И., Денисевич Д.С., Захаров И.Н., Захарова Е.Б. Структура и микротвердость титановых сплавов после электромеханической обработки и ультразвукового поверхностного легирования	4
Баранов Г.Л. Анализ контактных напряжений в зоне очага пластической деформации со знакопеременными силами трения	3
Баранов Г.Л. Контактные напряжения при пластическом течении металла в клиновидном канале	6
Башков О.В., Муравьев В.И., Лончаков С.З., Фролов А.В. Исследование дефектов-концентраторов напряжений по параметрам акустической эмиссии в процессе развития повреждений	12
Бердников В.И., Гудим Ю.А. О применении термодинамической модели идеальных ассоциированных растворов	7
Дашевский В.Я., Александров А.А., Леонтьев Л.И. Термодинамика растворов кислорода в расплавах систем Fe-Ni, Fe-Co и Co-Ni	1
Гаврилюк В.Г. Углерод, азот и водород в сталях: пластичность и хрупкость	10
Гервасьев М.А., Юровских А.С., Беликов С.В., Маслова О.В., Жилин А.С. Влияние Al и Si на образование аустенита в межкритическом интервале температур в Cr-Ni-Mo-стали	9
Грабовецкая Г.П., Мишин И.П., Степанова Е.Н., Чернов И.П., Булышко Д.Ю. Формирование и деформационное поведение ультрамелкозернистого сплава Zr-1Nb	2
Громов В.Е., Воробьев С.В., Сизов В.В., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф. Структурно-масштабные уровни увеличения усталостной долговечности сталей и сплавов электронно-пучковой обработкой	5
Громов В.Е., Морозов К.В., Юрьев А.Б., Перегудов О.А. Фрагментация зеренной структуры закаленных рельсов	10
Гурьев А.М., Иванов С.Г., Гурьев М.А., Черных Е.В., Иванова Т.Г. Химико-термическая обработка материалов для режущего инструмента	8
Захарченко М.В., Жиликов А.Ю., Липунов Ю.И., Эйсмонт К.Ю., Ярошенко Ю.Г. Влияние технологии термоупрочнения на микроструктуру рельсовой накладки	9
Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Перегудов О.А., Морозов К.В., Юрьев А.Б. Эволюция структурно-фазовых состояний рельсов при длительной эксплуатации	4
Иванов Ю.Ф., Денисова Ю.А., Тересов А.Д., Крыгина О.В. Формирование поверхностных сплавов при плавлении системы пленка – подложка высокоинтенсивным импульсным электронным пучком Сообщение 1	8
Иванов Ю.Ф., Денисова Ю.А., Тересов А.Д., Крыгина О.В. Формирование поверхностного сплава при плавлении системы пленка – подложка высокоинтенсивным импульсным электронным пучком. Сообщение 2	10
Капуткина Л.М., Блинов Е.В., Смартыгина И.В., Киндлоп В.Э., Щетинин И.В. Структура и прочность малоникелевой азотистой коррозионностойкой стали в литом и деформированном состоянии	11
Козлов Э.В., Попова Н.А., Конева Н.А. Дислокационная структура и ее компоненты в стали маргенистого класса	1
Лаптев А.И. Влияние сплавов-катализаторов с различными по отношению к углероду адгезионными характеристиками на синтез поликристаллических алмазов «карбонадо»	7
Лобанов М.Л., Редикульцев А.А., Русаков Г.М., Беляевских А.С. Влияние деформационного старения при холодной прокатке на формирование структуры и свойств технического сплава Fe-3% Si	7
Лоза А.В., Чигарев В.В., Рассохин Д.А., Шишкин В.В. Исследование деформаций в концевых сляках при непрерывной разливке стали	3
Лысенкова Е.В., Стомахин А.Я. Образование нитридов титана в стальных расплавах – термодинамические расчеты на основе уточненных справочных данных	6
Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М., Козлов Э.В., Бутуханов В.А., Чжу Чинхуа Формирование диффузионного слоя на рабочей поверхности инструмента, работающего в условиях динамического износа	2
Мейснер С.Н., Мейснер Л.Л., Лотков А.И., Твердохлебова А.В. Изменение структуры приповерхностного слоя никелида титана после ионной модификации ионами кремния	4
Морозов М.М., Потекаев А.И., Клопотов А.А., Маркова Т.Н., Клопотов В.Д. Длиннопериодические структуры в сплавах металлургических систем на основе Cu-Pd-Me и Ti-Al-Me	8
Никитина Е.Н., Громов В.Е., Алсараева К.В. Эволюция дефектной подсистемы конструкционной стали с бейнитной структурой при деформации	8
Осколкова Т.Н. Способ повышения износостойкости карбидовольфрамовых твердых сплавов	5
Райков С.В., Капралов Е.В., Иванов Ю.Ф., Будовских Е.А., Громов В.Е. Стрoение по глубине износостойкого покрытия, полученного электродуговым методом на стали	2
Райков С.В., Коновалов С.В., Капралов Е.В., Будовских Е.А., Целлермаер В.Я. Формирование износостойких поверхностных слоев наплавкой	10
Сосков А.А., Полетаев Г.М., Старостенков М.Д. Исследование особенностей миграции точечных дефектов в упорядоченном сплаве CuPt в условиях деформации	12
Столяров В.В. Трибологическое поведение наноструктурных материалов	8
Феоктистов А.В., Якушевич Н.Ф., Страхов В.М., Селянин И.Ф., Модзелевская О.Г. Термогравиметрический анализ изменения параметров литейного кокса и антрацита	11
Шаркеев Ю.П., Ерoшенко А.Ю., Данилов В.И., Глухов И.А., Толмачев А.И. Получение биоинертных сплавов в ультрамелкозернистом состоянии	2
Юрьев Б.П., Гольцев В.А., Луговкин В.В., Ярчук В.Ф. Сравнительный анализ описания гидравлического сопротивления плотного слоя из частиц разной формы	9

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И АВТОМАТИЗАЦИЯ
В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Александров А.Г., Ливаткин П.А., Положенцев К.А. Построение модели процесса управления напряжением вакуумной дуговой печи. Сообщение 1	3
Александров А.Г., Ливаткин П.А., Положенцев К.А. Построение модели процесса управления напряжением вакуумной дуговой печи. Сообщение 2	6
Банникова А.В., Корнет М.Е. О непараметрической идентификации и дуальном управлении динамическими процессами	4
Девятченко Л.Д., Соколова Э.И. Корреляция факторизованных условий труда и травматизма в черной металлургии	2
Ерёмченко А.Ю., Цыганков Ю.А. Разработка интеллектуальных систем управления процессом подготовки производства сортового прокатного стана	11
Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Глущенко А.И. К вопросу о разработке базы правил настройки параметров ПИ-регулятора при управлении нагревательными металлургическими объектами	11
Истомин А.С., Спириин Н.А., Онорин О.П., Павлов А.В., Гурин И.А. Разработка информационно-логической системы распознавания вида отклонения доменной плавки от нормального режима	8
Казяев М.Д., Самойлович Ю.А., Палеев В.С. Математическое моделирование напряженного состояния в рабочих валках холодной прокатки при ускоренном нагреве в камерной печи	9
Лавров В.В., Спириин Н.А., Бурыкин А.А., Щипанов К.А., Рыболовлев В.Ю. Разработка программного обеспечения в АСУП доменного цеха	9
Мышляев Л.П., Ивушкин А.А., Ивушкин К.А., Грачев В.В., Ляховец М.В. Состояние и пути развития систем управления со структурным разнообразием	5

Мышляев Л.П., Циряпкина А.В., Ивушкин К.А., Киселев С.Ф. Управление объектами с рециклом	5
Постольник Ю.С., Тимошпольский В.И. Расчеты плавления стальных плоских брикетов в жидкой ванне сталеплавильного агрегата. Сообщение 1. Математическая постановка задачи и аналитическое решение	6
Постольник Ю.С., Тимошпольский В.И. Расчеты плавления стальных плоских брикетов в жидкой ванне сталеплавильного агрегата. Сообщение 2. Расчеты режимов нагрева и плавления легированного брикета	7
Циряпкина А.В., Мышляев Л.П., Ивушкин К.А., Грачев В.В. Классификация объектов с рециклом и анализ влияния неопределенностей моделей на эффективность САР этих объектов	12
Шварц Д.Л. Теоретическое исследование прокатки рельсового профиля в универсальном калибре. Сообщение 1	6
Шварц Д.Л. Теоретическое исследование прокатки рельсового профиля в универсальном калибре. Сообщение 2	7
Шилов В.А., Куделин С.П., Инагович Ю.В., Бондин А.Р. Экспертная система технологии сортовой прокатки	9
Щипанов К.А., Спирин Н.А., Бурыкин А.А., Косаченко И.Е., Онорин О.П. Технологические особенности и программное обеспечение расчета задувочной шихты доменной печи	2

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Акнурланулы М., Рошин В.Е., Гудим Ю.А. Получение высокотитанистого шлака из ильменитового концентрата	11
Александров А.А., Евстифеев В.В., Ковальчук А.И. К расчету процессов деформации по линиям тока	4
Беляевских А.С., Русаков Г.М., Лобанов М.Л. Формирование специальных границ в ОЦК-металлах при больших степенях одноосной деформации	3
Домбровский Ю.М., Степанов М.С. Формирование композитного боридного покрытия на стали при микродуговой химико-термической обработке	3

Захарова Е.В., Татарнинова С.С., Быков Е.П. К вопросу оптимизации управления нагревом металла в нагревательных печах периодического действия	3
Кожухов А.А., Ткачев А.С., Мельников Е.Н. Экспериментальное изучение влияния полого (трубчатого) электрода на характер горения электрической дуги в дуговой сталеплавильной печи	3
Макаров М.А., Александров А.А., Дашевский В.Я. Влияние водорода на процесс десульфурации железа порошкообразным флюсом	7
Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Демина Е.И. Определение усилия резания на ножницах предварительно изогнутой полосы	5
Никитин А.Г., Тагильцев-Галета К.В. Система аварийного управления дробильного агрегата	2
Салина В.А., Байсанов С.О. Экспериментальные исследования получения комплексного ферросплава нового поколения	2
Скребиов А.М., Терзи В.В., Проценко Д.Н. Уникальный эксперимент по термодиффузии элементов в жидком чугуна	10
Чуманов И.В., Матвеева М.А. Определение микротвердости многослойного металлического материала, полученного методом электрошлакового переплава	4

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ

К 60-летию Иванова Юрия Федоровича	4
К 70-летию А.М. Глезера	12
К 80-летию со дня рождения Леопольда Игоревича Леонтьева	1
К 85-летию В.Е. Панина	10
Протопопов Е.В. Сибирскому государственному индустриальному университету 85 лет	5
Памяти Юсфина Юлиана Семеновича	7
Мальцев В.А., Набойченко С.С., Ярошенко Ю.Г. Ученые и педагоги, их творчество – научная и техническая база наших достижений (к 95-летию металлургического образования на Среднем Урале)	9
Указатель статей, помещенных в 2015 г.	12

Index of articles

“Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy”

HIGH-STRENGTH STEEL FOR POWER ENGINEERING

- Brian N. Leis Arresting propagating shear in pipelines. Part 1 1
 Brian N. Leis Arresting propagating shear in pipelines. Part 2 3

THE RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES
IN FERROUS METALLURGY

- V.I. Berdnikov, Y.A. Gudim Conditions for formation of dioxins at high-temperature combustion of chlorine-containing materials 2
 S.N. Kuznetsov, E.P. Volynkina, E.V. Protopopov High-temperature metallurgical aggregates – effective utilizers of hazardous organic wastes 5
 L.B. Pavlovich, S.G. Korotkov, A.A. Osokina The estimation of ecological risk of production activities of metallurgical plant 12
 V.N. Zorya, V.V. Korovushkin, A.A. Permyakov, E.P. Volynkina The research of the mineral composition and crystal structure of iron-containing components of technogenic waste of the metallurgical complex 5

RESOURCES SAVING IN FERROUS METALLURGY

- A.Yu. Botashev, N.U. Bisilov, R.S. Malsugenov Development and research of a new method of stamping 1
 S.I. Gertsyk, D.B. Tuktarov Dependence of nitrogen oxides concentration in smoke gases from the method of forming of fuel-air mixture 3
 Yu.G. Gurevich Impregnation kinetics of unsintered carbide frame by corrosion-resistant steel 18Cr10NiTi 1
 G.N. Gur'yanov, O.S. Zhelezkov, S.I. Platov, D.V. Terent'ev Marging and efficiency of forming of wire depending on the angle of drawing 1
 V.G. Lisienko, A.V. Laptёva, v Yu.N. Chesnoko, V.V. Lugovkin Comparative emission of greenhouse gas CO₂ in the processing of ferrous metallurgy 9
 D.I. Orelkina, A.L. Petelin, L.A. Polulyakh Analysis of the spatial distribution of secondary gas emissions in the outer influence zone of steel industry 11
 E.V. Protopopov, N.A. Kozyrev, A.A. Umansky, D.V. Boikov Improved technology and the ladle deoxidation of electric railway with a view to improving the quality of railway rolling 10
 G.S. Podgorodetskii, Yu.S. Yusfi n, A.Yu. Sazhin, V.B. Gorbunov, L.A. Polulyakh Manufacturing trends of generator gases from different types of solid fuel 6
 M.V. Temlyantsev, K.S. Konoz, A.Ju. Dziuba, A.A. Umanskii, N.V. Temlyantsev Development of metall-saving heating modes in continuous furnaces for heating of of continuously cast billets of 60S2HA steel 8
 Yu.G. Yaroshenko, Yu.I. Lipunov, M.V. Zakharchenko, K.Yu. Eismondt, E.V. Nekrasova Development of advanced thermostrengthening technique for environmental problem solution in metallurgical industry 4

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- A.E. Anikin, G.V. Galevskii, V.V. Rudneva Thermodynamic modeling of the interaction of technogenic silica fume with brown-coal semi-coke 4
 A.V. Basov, I.A. Magidson, N.A. Smirnov Density and electric conductivity of some synthetic slags for steel processing in ladle furnace 11
 V.I. Bazaikin, M.V. Temlyantsev, O.L. Bazaikina Influence of thermal stresses on the formation of the plastic flow zone in the beginning of hot forging of cylindrical workpiece 4
 V.I. Bazaykin, M.V. Temlyantsev, B.Y. Bobrov Strains of drawing initiation of cylindrical billet at the hot forging in combined anvil blocks 2
 M.Yu. Belomytsev, S.V. Mordashov Regularities of short-term creep of St3 steel 11

- V.I. Berdnikov, Yu.A. Gudim Three-parameter model of subregular solutions 4
 A.A. Bogatov, D.R. Salikhyanov Investigation of the precision of the internal channel of hot-rolled pipes during expansion 1
 M.A. Borovykh, O.A. Chikova, V.S. Tsepelev, V.V. V'yukhin The optimal method of temperature-time processing of liquid steels 32G1 and 32G2 3
 M.A. Borovykh, V.V. V'yukhin, O.A. Chikova, V.S. Tsepelev The influence of defects on the ductility of liquid steel 32G1 and 32G2 6
 S.P. Burmasov, A.G. Gudov, Yu.G. Yaroshenko, V.V. Meling, L.E. Dresvyankina The analysis of mass transfer in conditions of gas stirring at ladle refining of steel 9
 A.R. Fastykovskii, A.A. Umanskii Theory and practice of resource-saving technologies of mill bar production at the operating continuous rolling mills 5
 S.V. Filatov, S.A. Zagainov, L.Yu. Gileva, K.B. Pykhteeva Development of the analysis of iron oxide reduction processes 9
 G.V. Galevskii, V.V. Rudneva, A.K. Garbuzova Metalmatrix protective coatings with nanocomponents: formation, properties, application .. 5
 A.A. Gerasimova, A.G. Radyuk, A.E. Titlyanov Creating a diffusion layer on the narrow sides of the mold of continuous casting machine using aluminium thermal spray coatings 3
 Y. Gordon, S. Kumar, M. Freislich, Y. Yaroshenko The modern technology of iron and steel production and possible ways of their development 9
 A.I. P'inskii, P.A. Livatkin, K.A. Polozhentsev Analysis of the product after the introduction of a new automated control system of vacuum arc remelting 11
 A.N. Kalinogorskii, E.V. Protopopov, A.G. Chernyatevich, S.V. Feiler, V.I. Bagryantsev Investigation of application of vortex technologies for formation to refractory coatings converter lining. 1 now. Features in crushing liquid slag blowing tuyere vortex 10
 A.N. Kalinogorskii, E.V. Protopopov, A.G. Chernyatevich, S.V. Feiler, V.I. Bagryantsev Application of vortex technologies of refractory coating formation for converter lining. Report 2. Features and movement parameters of slag drops 12
 P.S. Kharlashin, R.D. Kuzemko, E.V. Protopopov, S.V. Feiler, A.K. Kharin Simulation of slag attachment to supersonic jet at its blowing in cavity of converter 2
 V.V. Konashkov, V.S. Tsepelev, O.A. Chikova, A.V. Belonosov Correlation of mechanical properties of ingots of steel GX40CrNiSi25-12 with their microstructure and melt viscosity 3
 N.A. Kozyrev, V.M. Schurupov, N.N. Kuchnarenko, O.E. Kozyreva, D.A. Titov Usage of tungsten-containing ores at welding 8
 M.L. Lobanov Nitriding peculiarities of Fe – 3 % Si technical alloy 2
 A.B. Maksimov, M.V. Gulyaev The deformations of distribution across the thickness of a wide balk under cyclic plastic bending 7
 T.Ya. Malysheva, R.M. Pavlov, N.R. Mansurova, T.V. Detkova Effect of natural ore formation on mineral composition and cold strength of iron ore fluxed agglomerates 3
 V.I. Matyukhin, S.G. Melamud, V.V. Shatsillo, O.V. Matyukhin, A.V. Matyukhina The investigation of firing of siderite small fractions in a rotary furnace 9
 S.G. Melamud, B.P. Yur'ev Calculation methods of tensions in burnt iron-ore pellets at their cooling 12
 G.G. Mikhailov, L.A. Makrovets, L.A. Smirnov Thermodynamic modeling of lanthanum interaction processes using iron-based metallic melts 12
 Yu.A. Mukhin, S.M. Bel'skii, V.B. Chuprov, K.V. Bakhaev, A.O. Stoyakin The features of temperature field of steel stripes under hot rolling 6
 O.I. Nokhrina, I.D. Rozhikhina, V.I. Dmitrienko, M.A. Golodova, Yu.A. Osipova Complex treatment of steel at ladle-furnace installation by converter vanadium slag while nitrogen purging 8
 O.I. Nokhrina, I.D. Rozhikhina, I.E. Proshunin, I.E. Hodosov Polymetallic manganese ore dressing and optimal use of the obtained concentrates 5
 V.M. Pavlovets Thermal stability analysis of iron-ore pellets produced using the technology of heat-spraying of wet charge 2

V.N. Peretyat'ko, S.V. Smetanin, M.V. Filippova New technology of tram grooved rail rolling	5	A.A. Bogatov, D.Sh. Nukhov Final and element modelling of the forge broach of strips without change of form and sizes in the conditions of alternating deformation	6
A.M. Povodator, V.S. Tsepelev, V.V. Konashkov Quick measurement of the attenuation ratio in photometric testing of the heavy-resistant metal alloys' viscosity	6	M.B. Borodina, S.V. Mironenko The parameters calculation of hydro-mechanical couplings with the differential planetary transmission gear	7
V.A. Poluboyarov, Z.A. Korotaeva, A.A. Zhdanok, V.A. Kuznetsov, A.V. Samokhin Intra-mold modification of cast iron. study of the influence of modifiers produced by plasma chemical and shs methods on service characteristics of grey cast iron. Report 2	8	V.V. Dragobetskii, A.A. Shapoval, V.G. Zagoryanskii Development of elements of personal protection equipment of new generation on the basis of layered metal composition	1
V.A. Poluboyarov, Z.A. Korotaeva, A.A. Zhdanok, V.A. Kuznetsov, A.V. Samokhin Intraform modification of cast iron. Influence of the composition and concentration of nanosized modifiers on the service characteristics of gray cast iron. Report 3	10	M.D. Kazyayev, A.V. Vokhmyakov, E.V. Kiselev, D.I. Spitchenko Complicated external heat exchange in the vertical chamber furnace designed for heat treatment of long products	9
Yu.S. Postol'nik, V.I. Timoshpol'skii, I.A. Trusova Analytical calculations of solidification and cooling processes in large- and heavy weight commercial ingots. Communication 1. Mathematical formulation of the problem and derivation of relations for a thermal layer scheme	8	N.A. Kozyrev, R.E. Kryukov, A.V. Roor, L.P. Bashchenko, U.I. Lipatova Research and development of new carbon-fluorine-containing additives for welding fluxes	4
E.V. Protopopov, A.G. Chernyatevich, S.V. Feiler Contribution of the chair of ferrous metallurgy to the development of the theory and technique of high-temperature modeling of converter bath blowing	5	S.M. Kulakov, A.I. Musatova, V.N. Kadykov, P.P. Baranov Application of the timing model in reengineering of the production systems in metallurgy	5
E.V. Protopopov, A.G. Chernyatevich, S.V. Feiler, V.V. Vakul'chuk, A.N. Sokol Formation peculiarities of metall-slag skulls on two-level oxygen lances at blowing of converter bath	4	Yu.N. Loginov, N.A. Babailov, D.N. Pervukhina Physical modeling of roll pressing at asymmetric effect on the sealing material	3
Ri Khosen, G.S. Dzyuba, Ri E.Kh., M.A. Ermakov, E.S. Mamontova Structure and properties control of chromium white cast iron by their modifying	6	N.I. Polushin, A.I. Laptev, A.A. Pozdnyakov Development of high-pressure chamber for long-term experiment at high pressures and temperatures in the area of diamond stability	11
I.D. Rozhikhina, O.I. Nokhrina, V.I. Dmitrienko, M.A. Platonov Modification of steel by barium and strontium	12	A.N. Savel'ev, M.V. Kipervasser, D.S. Anikanov The assessment of power changes in motor parameters in case of emergencies in the mechanical part of belt conveyor	12
Yu.I. Storozhev, L.N. Podborskii, I.A. Khudyakov Metallization of molded ore-coal materials in circular furnace	4	Yu.G. Yaroshenko, V.S. Shvydkii, N.A. Spirin, V.V. Lavrov, V.Yu. Noskov Displaceable heat exchange in the smelting zone and features of transients in blast furnace	9
M.V. Temlyantsev, M.V. Filippova, V.N. Peretyat'ko Hot plastic deformation of steel 08Cr21Ni5Ti	10	L.A. Zainullin, M.V. Kalganov, D.V. Kalganov, V.F. Yarchuk Investigation of cooling efficiency of the rotating high temperature furnace fan	9
O.K. Tokovoi, D.V. Shaburov The research of nonmetallic inclusions in vacuum-degassed austenitic stainless steel by the method of scanning electron microscopy	12	K.A. Zubarev, G.I. Kotelnikov, A.D. Lopatenko, A.E. Semin Calculation of changes in composition of iron-based alloys during the melting in a vacuum induction furnace	11
K.N. Vdovin, N.A. Feoktistov, E.V. Sinitskii, D.A. Gorlenko, N.A. Durov High-manganese smelting of steel in electric arc steelmaking furnace. Technology. Report 1	10	MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES	
G.V. Voronov, V.A. Gol'tsev, I.V. Glukhov Aerodynamics and temperature field features in the modern EAF workspace	9	A.N. Afonin, A.I. Larin, A.V. Makarov Heterogeneous hardening of machines parts by surface plastic deformation	11
E.P. Zatsepin, A.V. Galkin Modeling of distribution of the electromagnetic field in the slag's layer at ladle furnace	7	M.I. Aleutdinova, V.V. Fadin Cold work hardening effect on wear of 0,2 % C steel in dry sliding contact at high current density	6
R.N. Zenkin, N.N. Zenkin, A.I. Val'ter The development of a test land stand for artillery mounts AK-203 and AK-203m of high-strength cast iron	7	V.P. Bagmutov, V.I. Vodop'yanov, D.S. Denisevich, I.N. Zakharov, E.B. Zakharova Structure and microhardness of titanium alloys after electromechanical treatment and ultrasonic surface alloying	4
I.F. Seljanin, A.V. Feoktistov, V.B. Deev, O.G. Modzelevskaja, A.A. Kucenko Physical and chemical analysis of practice ability modifying ability of barium-strontium carbonate BSK-2 in cast iron manufacturing	10	G.L. Baranov Analysis of the contact stresses in the zone of plastic deformation with sign- variable friction forces	3
V.P. Tsybmal, V.I. Kozhemyachenko, I.A. Rybenko, A.G. Padalko, A.A. Olennikov Using the principles of self-organization and dissipative structures in a new jet-emulsion of metallurgical process	8	G.L. Baranov Contact stresses at plastic metal flow in a wedge-shaped channel	6
E.A. Shevchenko, A.M. Stolyarov, A.N. Shapovalov, K.V. Baranchikov Rational length of supported system of narrow faces of concast billet for preventing its convexity	1	O.V. Bashkov, V.I. Murav'ev, S.Z. Lonchakov, A.V. Frolov The research of defects – stress concentrators by the acoustic emission parameters at the process of damage development	12
E.K. Yakubailik, A.D. Balaev, I.M. Ganzhenko, P.U. Butov The correlation of magnetic parameters and the iron content in products of wet magnetic separation	10	V.I. Berdnikov, Yu.A. Gudim The thermodynamic model of ideal associated solutions	7
N.F. Yakushevich, O.A. Polyakh, G.V. Galevskii Thermodynamic equilibrium in the system silicon alloy–slag–gas	12	V.Ya. Dashevskii, A.A. Aleksandrov, L.I. Leont'ev Thermodynamics of oxygen solutions in the Fe – Ni, Fe – Co and Ni – Co melts	1
N.F. Yakushevich, O. A. Polyakh, G.V. Galevskii, A.A. Tyazhina Analysis of phase and chemical equilibrium in the system of melt (Fe – Si – C) – slag (CaO – Al ₂ O ₃ – SiO ₂) – gas (O ₂ – SiO – CO)	5	A.V. Feoktistov, N.F. Yakushevich, V.V. Strakhov, I.F. Selyanin, O.G. Modzelevskaya Thermogravimetric analysis of changes in parameters of cupola coke and anthracite	11
I.M. Yachikov, E.M. Kostylev Behavior of the main electromagnetic forces acting on the arc in three-phase arc furnace	7	V.G. Gavriliuk Carbon, nitrogen and hydrogen in steels: plasticity and brittleness	10
Yu.S. Yusfin, T.Ya. Malysheva Influence of structural features of magnetite crystals on the process of agglomerate sintering	7	M.A. Gervas'ev, A.S. Yurovskikh, S.V. Belikov, O.V. Maslova, A.S. Zhilin Effect of Al and Si on the formation of austenite in intercritical temperature range in Cr – Ni – Mo-steel	9
ENGINEERING IN FERROUS METALLURGY		G.P. Grabovetskaya, I.P. Mishin, E.N. Stepanova, I.P. Hernov, D.Yu. Bulynko Forming and deformation behavior of the ultrafine grained Zr – 1Nb alloy	2
Yu.M. Antoshchenkov, I.M. Taupek Research of the process of axisymmetric upsetting by computer simulation	1	V.E. Gromov, S.V. Vorob'ev, V.V. Sizov, S.V. Kononov, Yu.F. Ivanov Structural-scale levels of fatigue durability increase of steels and alloys by electron-beam treatment	5
		V.E. Gromov, K.V. Morozov, A.B. Yur'ev, O.A. Peregodov Grain structure fragmentation of quenched rails	10
		A.M. Gur'ev, S.G. Ivanov, M.A. Gur'ev, E.V. Chernykh, T.G. Ivanova Thermochemical treatment of the materials for cutting tools	8

Yu.F. Ivanov, V.E. Gromov, O.A. Peregudov, K.V. Morozov, A.B. Yur'ev Evolution of rail structure-phase states at continuous service	4	A.S. Istomin, N.A. Spirin, O.P. Onorin, A.V. Pavlov, I.A. Gurin Development of information-logical system of recognition of deviations for blast furnace production from normal mode	8
Yu.F. Ivanov, Yu.A. Denisova, A.D. Teresov, O.V. Krygina Formation of surface alloys at melting of film – substrate system by high-intensity pulsed electron beam. Report 1	8	M.D. Kazyaev, Yu.A. Samoiloovich, V.S. Paleev Mathematical modeling of the thermo-stressed condition in the cold work rolls during fast heating in the chamber furnace	9
Yu.F. Ivanov, Yu.A. Denisova, A.D. Teresov, O.V. Krygina Formation of surface alloys at melting of film-substrate system by high-intensity pulsed electron beam. Report 2	10	V.V. Lavrov, N.A. Spirin, A.A. Burykin, K.A. Shchipanov, V.Y. Rybolovlev Development of the CAM system software at blast furnace plant	9
L.M. Kaputkina, E.V. Blinov, I.V. Smarygina, V.E. Kindop, I.V. Shchetinin Structure and strength of low-nickel nitrogenous stainless steel in cast and deformed state	11	L.P. Myshlyayev, A.A. Ivushkin, K.A. Ivushkin, V.V. Grachev, M.V. Lyakhovets Situation and development trends of Control Systems with structural diversity	5
E.V. Kozlov, N.A. Popova, N.A. Koneva Dislocation structure and its components in steel of martensite class	1	L.P. Myshlyayev, A.V. Tsiiryapkina, K.A. Ivushkin, S.F. Kiselev Management of objects with recycle	5
A.I. Laptev Influence of alloys-catalysts with various adhesive properties to carbon on the synthesis of carbonado polycrystalline diamond	7	Yu.S. Postol'nik, V.I. Timoshpol'skii The calculations of steel fl at briquettes melting in liquid bath of a steelmaking unit. Report 1. Mathematical formulation of the problem and its analytical solution ...	6
M.L. Lobanov, A.A. Redikultsev, G.M. Rusakov, A.S. Belyaevskikh Effect of the strain aging during cold rolling on the structure and properties of Fe – 3 % Si steel	7	Yu.S. Postol'nik, V.I. Timoshpol'skii The calculations of steel fl at briquettes melting in liquid bath of a steelmaking unit. Report 2. Calculations of heating and melting modes of an alloyed briquette	7
A.V. Loza, V.V. Chigarev, D.A. Rassokhin, V.V. Shishkin Research of deformations in final slabs at continuous casting of steel	3	D.L. Shvarts Theoretical investigation of rail profile rolling in universal caliber. Report 1	6
E.V. Lysenkova, A.Ya. Stomakhin Formation of TiN inclusions in steel melts – thermodynamic calculations based on the verified data	6	D.L. Shvarts Theoretical investigation of rail profile rolling in universal caliber. Report 2	7
B.D. Lygdenov, A.M. Gur'ev, E.V. Kozlov, V.A. Butukhanov, Chzhu Chinkhua Formation of diffusion layer on a working surface of a tool, working in the conditions of dynamic wear	2	V.A. Shilov, S.P. Kudelin, Yu.V. Inatovich, A.R. Bondin Expert system of bar rolling technology	9
S.N. Meisner, L.L. Meisner, A.I. Lotkov, A.V. Tverdokhlebova Refinement of the structure of the titanium nickelide near-surface layers after silicon ion modification	4	K.A. Shchipanov, N.A. Spirin, A.A. Burykin, I.E. Kosachenko, O.P. Onorine Technological features and software calculations of blowing charge in blast furnace	2
M.M. Morozov, A.I. Potekaev, A.A. Klopotov, T.N. Markova, V.D. Klopotov Long-period structures in alloys of metallic systems based on Cu – Pd – Me and Ti – Al – Me	8	A.V. Tsiiryapkina, L.P. Myshlyayev, K.A. Ivushkin, V.V. Grachev Classification of objects with recycle and impact analysis of models uncertainty on effective management systems of these objects ...	12
E.N. Nikitina, V.E. Gromov, K.V. Alsaravaeva Carbide subsystem evolution of constructional steel with bainite structure under deformation	8	BRIEF COMMUNICATIONS	
T.N. Oskolkova The ways of increasing wear resistance ability of WC – Co hard alloy	5	M. Aknurlanuly, V.E. Roshchin, Y.A. Gudim Production of high-titanium slag from ilmenite concentrate	11
S.V. Raikov, E.V. Kapralov, Yu.F. Ivanov, E.A. Budovskikh, V.E. Gromov Depth structure of wear resistance coating on steel obtained by electric arc method	2	A.A. Aleksandrov, V.V. Evstifeev, A.I. Koval'chuk The calculation of deformation processes along the streamlines	4
S.V. Raikov, S.V. Konovalov, E.V. Kapralov, E.A. Budovskikh, V.Ya. Tselmermaer The formation of a wear-resistant weld surface layers	10	A.S. Belyaevskikh, G.M. Rusakov, M.L. Lobanov The special grain boundaries formation in BCC metals during strong uniaxial deformation	3
A.A. Soskov, G.M. Poletaev, M.D. Starostenkov The study of features of point defects migration in CuPt ordered alloy in the conditions of deformation	12	I.V. Chumanov, M.A. Matveeva Determination of microhardness multilayer metal material obtained by electroslag remelting	4
V.V. Stolyarov Tribological behavior of nanostructured materials	8	Yu.M. Dombrovskii, M.S. Stepanov Formation of composite boride coating on steel at microarc thermochemical treatment	3
Yu.P. Sharkeev, A.Yu. Eroshenko, V.I. Danilov, I.A. Glukhov, A.I. Tolmachev Forming of bioinert ultrafine-grained alloys	2	E.V. Zakharova, S.S. Tatarinova, E.P. Bykov Optimizing the control of metal heating in batch heating furnaces	3
B.P. Yur'ev, V.A. Gol'tsev, V.V. Lugovkin, V.F. Yarchuk Comparative analysis of the hydraulic resistance descriptions in a dense layer of different shape particles	9	A.A. Kozhukhov, A.S. Tkachev, E.N. Mel'nikov Experimental study of the influence of hollow (tubular) electrode on nature of electric arc burning in EAF	3
M.V. Zakharchenko, A.Yu. Zhilyakov, Yu.I. Lipunov, K.Yu. Eismondt, Yu.G. Yaroshenko Influence of the quenching technologies on the joint bar microstructure	9	M.A. Makarov, A.A. Alexandrov, V.Ya. Dashevskii Influence of hydrogen on process of iron desulfurization by powdered flux	7
INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY		V.A. Mal'tsev, S.S. Naboichenko, Yu.G. Yaroshenko Scientists and educators, their creativity – scientific and technical basis of our achievements (to the 95th anniversary of metallurgical education in the Middle Urals)	9
A.G. Aleksandrov, P.A. Livatkin, K.A. Polozhentsev Creating a model of voltage control in vacuum arc furnace. Report 1	3	A.G. Nikitin, J.A. Epifanctev, E.I. Demina The determination of cutting force on the scissors at pre-curved strip cutting	5
A.G. Aleksandrov, P.A. Livatkin, K.A. Polozhentsev Creating a model of voltage control in vacuum arc furnace. Report 2	6	A.G. Nikitin, K.V. Tagil'tsev-Galeta Emergency control system of crusher	2
A.V. Bannikova, M.E. Kornet Nonparametric identification and dual control of dynamic processes	4	V.A. Salina, S.O. Baisanov Experimental researches of complex ferroalloy new type production	2
L.D. Devyatchenko, Ye.I. Sokolova Correlation of factored working conditions and injuries in the steel industry	2	A.M. Skrebtsov, V.V. Terzie, D.N. Protsenko Unique experiment on thermal diffusion of elements in liquid cast iron	10
A.Y. Eremenko, Y.A. Tsigankov Control intellectualization design for production process preparation of section mill	11	To the 60th Anniversary of Yuriy Fedorovich Ivanov	4
Yu.I. Eremenko, D.A. Poleshenko, A.I. Glushchenko Development of the database settings rules of PI-regulators at control of heating metallurgical plants	11	To the 70th Anniversary of A.M. Glezer	12
		To the 80th Anniversary of Leont'ev L.I.	1
		To the 85th Anniversary of V.E. Panin	10
		E.V. Protopopov To the 85-th Anniversary of Siberian State Industrial University	5
		To the memory of Yulian Yusfin	7
		Index of articles “Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy” for 2015. Vol. 58	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 22.12.2015. Формат 60×90 ¹/₈. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,0. Заказ 4882. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСиС.
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4.
Тел./факс: (499) 236-76-17, 236-76-35