

# ИЗВЕСТИЯ

## ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 61 Номер 10 2018

### • МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

ИЗУЧЕНИЕ НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА ХАРАКТЕРА ПОТЕРЬ ЖИДКОСТИ С БРЫЗГАМИ В ВАРИАНТЕ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ

ПРЕИМУЩЕСТВА И РИСКИ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ С ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ

### • МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ ТРУБНОЙ СТАЛИ 17Г1С-У, МИКРОЛЕГИРОВАННОЙ БОРОМ

МЕХАНИЗМЫ УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЕЙ С БЕЙНИТНОЙ И МАРТЕНСИТНОЙ СТРУКТУРАМИ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ СЖАТИЕМ

### • ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НИКЕЛЯ И ЖЕЛЕЗА ИЗ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО СИЛИКАТНОГО РАСПЛАВА В ПРОЦЕССЕ БАРБОТАЖА. СООБЩЕНИЕ 2. ВОССТАНОВИТЕЛЬ – СМЕСЬ  $H_2-H_2O$

СИНТЕЗ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО ДИБОРИДА ХРОМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОВОЛОКНИСТОГО УГЛЕРОДА

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

# ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

---

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

---

№ 10, 2018

Издается с января 1958 г. ежемесячно

Том 61

---

# ИЗВЕСТИЯ

## ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

### ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

**Главный редактор:** ЛЕОНТЬЕВ Л.И.  
(Российская Академия Наук, г. Москва)

**Заместитель главного редактора:** ПРОТОПОПОВ Е.В.  
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

**Заместитель ответственного секретаря:** БАЩЕНКО Л.П.  
(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

#### Члены редакционной коллегии:

АЛЕШИН Н.П. (Российская Академия Наук, г. Москва)

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

АШИХМИН Г.В. (ОАО «Институт Цветмет-обработка», г. Москва)

БАЙСАНОВ С.О. (Химико-металлургический институт им. Ж.Абишева, г. Караганда, Республика Казахстан)

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

БРОДОВ А.А., редактор раздела «**Экономическая эффективность металлургического производства**» (ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва)

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

ГЛЕЗЕР А.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

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

ГРИГОРОВИЧ К.В., редактор раздела «**Металлургические технологии**» (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

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

ДМИТРИЕВ А.Н. (Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург)

ДУБ А.В. (ЗАО «Наука и инновации», г. Москва)

ЗИНГЕР Р.Ф. (Институт Фридриха-Александра, Германия)

ЗИНИГРАД М. (Институт Ариэля, Израиль)

ЗОЛОТУХИН В.И. (Тулский государственный университет, г. Тула)

КОЛМАКОВ А.Г. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

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

КОСТИНА М.В. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

КОСЫРЕВ К.Л. (АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва)

КУРГАНОВА Ю.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)

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

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

ЛИНН Х. (ООО «Линн Хаи Терм», Германия)

ЛЫСАК В.И. (Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград)

МЫШЛЯЕВ Л.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

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

ОСТРОВСКИЙ О.И. (Университет Нового Южного Уэльса, Сидней, Австралия)

ПОДГОРОДЕЦКИЙ Г.С., редактор раздела «**Ресурсосбережение в черной металлургии**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ПЫШМИНЦЕВ И.Ю., редактор раздела «**Инновации в металлургическом промышленном и лабораторном оборудовании, технологиях и материалах**» (Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности, г. Челябинск)

РАШЕВ Ц.В., редактор раздела «**Стали особого назначения**» (Академия наук Болгарии, Болгария)  
РУДСКОЙ А.И. (Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург)

СИВАК Б.А. (АО АХК «ВНИИМЕТМАШ», г. Москва)

СИМОНЯН Л.М., редактор раздела «**Экология и рациональное природопользование**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

СМИРНОВ Л.А. (ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург)

СОЛОДОВ С.В., редактор раздела «**Информационные технологии и автоматизация в черной металлургии**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

СПИРИН Н.А. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)

ТАНГ ГУОИ (Институт перспективных материалов университета Циньхуа, г. Шеньжень, Китай)

ТЕМЛЯНЦЕВ М.В. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

ФИЛОНОВ М.Р., редактор раздела «**Материаловедение**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ШЕШУКОВ О.Ю. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)

ШПАЙДЕЛЬ М.О. (Швейцарская академия материаловедения, Швейцария)

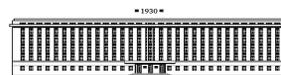
ЮРЬЕВ А.Б. (АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк)

ЮСУПОВ В.С. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)

#### Учредители:



Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»



Сибирский государственный индустриальный университет

Настоящий номер журнала подготовлен к печати  
Сибирским государственным индустриальным университетом

#### Адреса редакции:

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

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

# IZVESTIYA

## VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA

---

# IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY

---

**Editor-in-Chief:** LEONT'EV L.I.  
(Russian Academy of Sciences, Moscow)

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

**Deputy Coordinating Editor:** BASHCHENKO L.P.  
(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

---

### Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

I.YU. PYSHMINTSEV, Editor of the section  
"**Innovations in metallurgical industrial and  
laboratory equipment, technologies and materials**"

(Russian Research Institute of the Pipe Industry,  
Chelyabinsk)

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

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

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

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

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

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

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

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

M. SPEIDEL (Swiss Academy of Materials, Switzerland)

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

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

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

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

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

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

M. ZINIGRAD (Ariel University, Israel)

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

---

### Founders:



National Research Technological University "MISIS"



Siberian State Industrial University

---

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

### Editorial Addresses:

119991, Moscow, Leninskii prosp., 4  
National Research Technological University "MISIS",  
Tel.: +7 (495) 638-44-11, +7 (499) 236-14-27  
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@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@sibsiiu.ru

---

Journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is included in the "List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, in which should be published major scientific results of dissertations for the degree of doctor and candidate of sciences" by the decision of the Higher Attestation Commission.

---

The journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is indexed in Scopus.

---

Journal "Izvestiya VUZov. Chernaya Metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy" is registered  
in Federal Service for Supervision in the Sphere of Mass Communications **PI number FS77-35456**

## СОДЕРЖАНИЕ

### МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Семькин С.И., Голуб Т.С., Семькина Е.В., Дудченко С.А., Вакульчук В.В. Изучение на физической модели кислородного конвертера характера потерь жидкости с брызгами в варианте применения низковольтных потенциалов ..... 755
- Загайнов С.А., Филатов С.В., Мясоедов С.В., Гилева Л.Ю., Титов В.Н. Преимущества и риски работы доменных печей с высокой интенсивностью ..... 760
- Сибэгатуллин С.К., Харченко А.С., Девятченко Л.Д. Оценка неравномерности распределения шихтовых материалов в доменной печи ..... 766

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Бабенко А.А., Жучков В.И., Сельменских Н.И., Уполовникова А.Г. Структура и свойства низкоуглеродистой трубной стали 17Г1С–У, микролегированной бором ..... 774
- Алеутдинова М.И., Фадин В.В., Алеутдинов К.А. Износ спеченных композитов на основе подшипниковой стали при граничном трении с токосъемом по меди ..... 780
- Аксёнова К.В., Никитина Е.Н., Иванов Ю.Ф., Косинов Д.А. Механизмы упрочнения сталей с бейнитной и мартенситной структурами при деформации сжатием ..... 787

### ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Кудинов Д.З., Селиванов Е.Н. Термодинамическое моделирование восстановления никеля и железа из многокомпонентного силикатного расплава в процессе барботажа. Сообщение 2. Восстановитель – смесь  $H_2-H_2O$  ..... 794
- Крутский Ю.Л., Дюкова К.Д., Кузьмин Р.И., Нецкина О.В., Иорх А.Е. Синтез высокодисперсного диборида хрома с использованием нановолокнистого углерода ..... 800

### ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

- Шорохова А.В., Новичихин А.В., Юрьева Е.Н. Социально ориентированная информационная технология повышения уровня экологической безопасности горно-металлургического района ..... 807

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

- Зимин А.В., Буркова И.В., Митьков В.В., Зимин В.В. Формирование программ обучения пользователей ERP-системы ..... 813
- Киселева Т.В., Михайлов В.Г., Степанов И.Г. Управление эколого-экономической системой коксохимического предприятия ... 818

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Каледин В.О., Тагильцев-Галета К.В., Ульянов А.Д. Модель термомеханического поведения конструкций, усиленных волокнистым пластиком ..... 824
- Александров А.А., Дашевский В.Я. Влияние титана на растворимость кислорода в расплавах системы Ni–Co–Cr ..... 827

## CONTENTS

### METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- S.I. Semykin, T.S. Golub, E.V. Semykina, S.A. Dudchenko, V.V. Vakul'chuk Study of the interrelations of blowing parameters, options of electric influence and nature of liquid spraying by physical modeling ..... 755
- S.A. Zagainov, S.V. Filatov, S.V. Myasoedov, L.Yu. Gileva, V.N. Titov Benefits and risks of blast furnaces with high intensity ..... 760
- S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, L.D. Devyatchenko Evaluation of uneven distribution of charge materials at blast furnace ..... 766

### MATERIAL SCIENCE

- A.A. Babenko, V.I. Zhuchkov, N.I. Sel'menskikh, A.G. Upolovnikova Structure and properties of 17G1S–U low-carbon pipe steel microalloyed by boron ..... 774
- M.I. Aleutdinova, V.V. Fadin, K.A. Aleutdinov Wear of sintered composites based on bearing steel at boundary friction with current collection against copper ..... 780
- K.V. Aksenova, E.N. Nikitina, Yu.F. Ivanov, D.A. Kosinov Hardening mechanisms of steels with bainite and martensite structures at compressive deformation ..... 787

### PHYSICO-CHEMICAL BASICS OF METALLURGICAL PROCESSES

- A.S. Vusikhis, L.I. Leont'ev, D.Z. Kudinov, E.N. Selivanov Thermodynamic modeling of nickel and iron reduction from multicomponent silicate melt in bubbling process. Report 2. Reducing agent – a mixture of  $H_2 - H_2O$  ..... 794
- Yu.L. Krutskii, K.D. Dyukova, R.I. Kuz'min, O.V. Netskina, A.E. Iorkh Synthesis of finely dispersed chromium diboride from nanofibrous carbon ..... 800

### ECOLOGY AND RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES

- A.V. Shorokhova, A.V. Novichikhin, E.N. Yur'eva Socially oriented information technology of increasing the level of ecological safety of mining and metallurgical area ..... 807

### INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

- A.V. Zimin, I.V. Burkova, V.V. Mit'kov, V.V. Zimin Development of training programs for users of enterprise resource planning system ..... 813
- T.V. Kiseleva, V.G. Mikhailov, I.G. Stepanov Management of ecological-economic system of coking plant ..... 818

### SHORT REPORTS

- V.O. Kaledin, K.V. Tagil'tsev-Galeta, A.D. Ul'yannov Model of thermomechanical behavior of structures reinforced by fibrous plastic .. 824
- A.A. Aleksandrov, V.Ya. Dashevskii Effect of titanium on oxygen solubility in Ni–Co–Cr melts ..... 827

УДК 669.184.244.66:669.184.235.001.5

## ИЗУЧЕНИЕ НА ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА ХАРАКТЕРА ПОТЕРЬ ЖИДКОСТИ С БРЫЗГАМИ В ВАРИАНТЕ ПРИМЕНЕНИЯ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ

**Семькин С.И.**, к.т.н., старший научный сотрудник отдела металлургии стали (isisevmykin@gmail.com)

**Голуб Т.С.**, к.т.н., научный сотрудник отдела металлургии стали (dove@email.ua)

**Семькина Е.В.**, научный сотрудник отдела металлургии стали (isisevmykin@gmail.com)

**Дудченко С.А.**, научный сотрудник отдела металлургии стали (s.dudchenko@meta.ua)

**Вакульчук В.В.**, младший научный сотрудник отдела металлургии стали

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины  
(49050, Украина, г. Днепр, пл. Академика Стародубова, 1)

**Аннотация.** Основным и решающим фактором продувки в кислородных конвертерах является взаимодействие высокоскоростной струи кислорода с расплавленной ванной. Характер этого взаимодействия определяет гидродинамику и величину потерь металла с выносами и выбросами, исследование которых наиболее доступно с помощью холодного моделирования. В работе приведены результаты лабораторных исследований на изготовленной в масштабе 1:30 физической модели 160-т конвертера. Изучали влияние дутьевых режимов на характер разбрызгивания жидкости при ее продувке через фурму с пятисопловым наконечником на 10 горизонтах по высоте модели по трем зонам рабочего объема модели конвертера: прифурменной, пристеночной и зоне выноса за пределы модели, что на практике соответствует интенсивности формирования гарнисажа на фурме, горловине конвертера и элементах ОКГ. Выявлено, что общее количество брызг жидкости, выносимой за пределы модели, носит экстремальный характер в зависимости от уровня расположения фурмы с заметным снижением количества брызг при нулевой высоте ее расположения над жидкостью, а также выше определенных значений. Установлена возможность снижения интенсивности формирования брызг и величины потерь жидкости в пределах исследованных зон за счет применения низковольтного электрического потенциала: при отрицательной полярности в большей степени в прифурменной и в пристеночной зонах, а при положительной полярности – за пределы модели. Выявлено, что начало практического влияния потенциала и максимальная величина «полезной» мощности, выделяемой в подфурменной зоне, определяются конкретным сочетанием значения давления перед соплом и уровнем расположения наконечника фурмы: чем выше давление перед соплом, тем выше необходимо располагать фурму для достижения максимальных значений «полезной» мощности. Выполненные на физической модели эксперименты при продувке солевых водных растворов газами с использованием электрических потенциалов показали возможность расширения области применения разрабатываемого метода на процессы, не связанные с металлургией.

**Ключевые слова:** физическое моделирование, продувка жидкой среды, пятисопловая фурма, электрический потенциал.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-755-759

Основным и решающим фактором продувки в кислородных конвертерах является взаимодействие высокоскоростной струи кислорода с расплавленной ванной. Характер этого взаимодействия определяет гидродинамику и тепло-массообмен конвертерной ванны, а также величину потерь металла с выносами и выбросами [1 – 5]. Принципы организации дутьевого режима в настоящее время являются одинаковыми для конвертеров различной емкости [6 – 10], поэтому в большегрузных ЛД-конвертерах из-за концентрации дутья неизбежно возникают сложности при организации циркуляции металла по всему объему сталеплавильной ванны. Это в значительной мере влияет на интенсивность разбрызгивания продуваемой среды, а следовательно, и на уровень потерь металла с выносами и выбросами при его продувке, а значит актуальным остается поиск рациональных дутьевых режимов.

С целью получения дополнительных знаний о гидродинамике конвертерной ванны и особенностях раз-

брызгивания жидкой среды при ЛД-процессе, в том числе в условиях подвода низковольтного электрического потенциала [11], в настоящей работе были выполнены исследования на физической модели 160-т конвертера, изготовленной в масштабе 1:30.

Для моделирования конвертерной продувки жидкой стали, в том числе с наложением низковольтного потенциала, использовали водные растворы поваренной соли, которые продували нейтральным газом через верхнюю пятисопловую фурму (угол наклона сопел 20°). Исследование базировалось на дифференцированной по 10 горизонтам высоты модели (от 10 калибров сопла над жидкостью с шагом 20 калибров до горловины) оценке интенсивности брызгообразования на двух участках по радиусу: зона «А» – вблизи фурмы (имитация движения жидкости в подфурменной зоне и набрызгивания среды на фурму); зона «Б» – в направлении стенки модели (имитация набрызгивания расплава

на стенку и горловину). Оценка проводилась в течение одной минуты путем сбора жидкости в вертикально расположенные пробоотборники, которые после взвешивались на электронных весах АХИС-0005 (точность измерения 0,5 мкг). Также оценивали величину потерь жидкости, выносимой за пределы модели, – зона «В», характеризующая образование настыли на элементах охладителя конвертерных газов, путем взвешивания модели с жидкостью до и после продувки с учетом количества жидкости в пробоотборниках. Продувка проводилась при положении фурмы 0, 10, 20, 40 и 60 калибров относительно уровня спокойной жидкости при давлении газа перед соплом 0,5; 1,0; 2,0 и 3,0 ати. Эксперименты проводились по вариантам: без воздействий электрического потенциала (вариант 1), с подведением к фурме отрицательного полюса источника тока (вариант 2) и с подведением к фурме положительного полюса (вариант 3). В рамках экспериментов соблюдался неизменным дутьевой режим продувки.

Исследования показали, что интенсивность брызгообразования и связанное с этим наполнение каплями отдельных пробников по горизонтам изменяется по экспоненциальной зависимости, снижаясь в десятки раз при переходе к верхним уровням.

На рис. 1 для примера приведены диаграммы изменения общей массы собранной жидкости по зонам при давлении перед соплом 2 ати. Полученные результаты для продувки без воздействий коррелируются с известными тенденциями, присущими ЛД-процессу [12 – 15]. В зоне «А» отмечается практически постоянное количество собранных брызг, не изменяющееся в зависимости от высоты размещения фурмы в модели. При этом количество брызг увеличивалось

с повышением давления продувочного газа или его расхода на одно сопло, что определяется соответствующим изменением импульса высокоскоростной струи в месте встречи с поверхностью жидкости.

Установленные эффекты поясняются тем, что источником образования капель жидкости является подфурменная зона газодинамического дробления жидкости вследствие неустойчивого состояния пленки на поверхности пульсирующей лунки.

При расположении фурмы высоко над уровнем жидкости капли брызг, сформированные в подфурменной зоне, посредством аэродинамических потоков активно выносятся к стенке модели и за ее пределы, а брызги, сформированные на низких горизонтах в зоне «А», вследствие инжекционного турбулентного движения газо-жидкостного потока вблизи фурмы, имеют возможность возвращаться в объем жидкой ванны. В случае приближения наконечника фурмы к поверхности жидкости интенсивность брызгообразования снижается вследствие более глубокого проникновения газовых струй в жидкость, причем минимальный уровень был зафиксирован при расположении наконечника фурмы вблизи касания с поверхностью, когда создаются условия полного затопления газового потока в жидкую среду. При этом в определенных условиях, определяемых положением фурмы, в подфурменной зоне за счет инжекции газовой струи может формироваться целостный и частично замкнутый вихревой газо-жидкостной поток, в пределах которого создаются постоянные условия образования брызг.

При анализе результатов опытов с применением низковольтного потенциала (варианты 2 и 3) установлено их постоянно присутствующее положительное

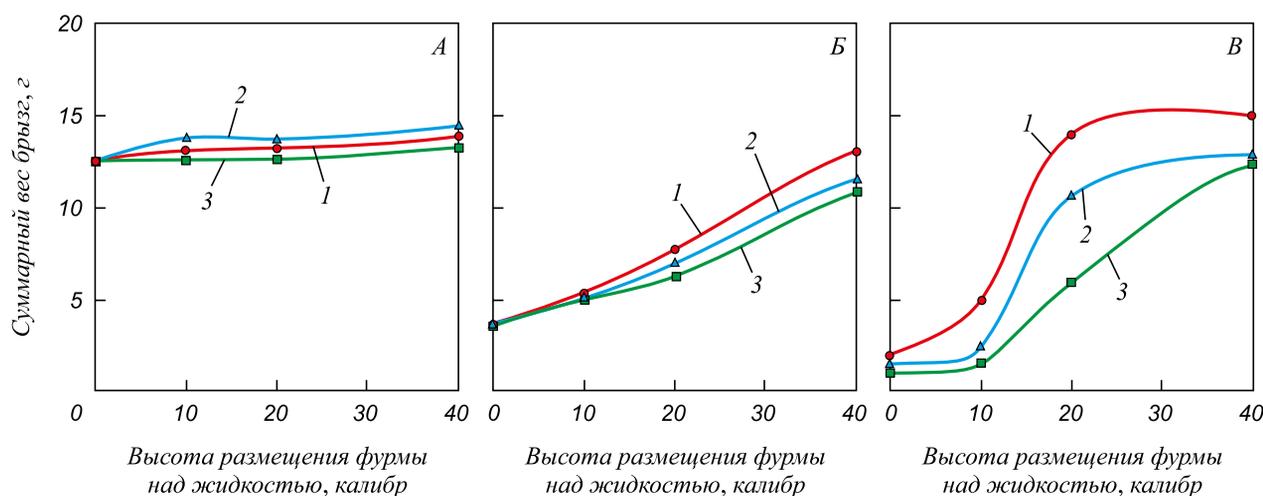


Рис. 1. Изменение суммарного количества брызг, собранных накопителями, расположенными в трех участках модели (давление газа перед соплом 2 атм): «А» – в зоне фурмы, «Б» – вдоль стенки модели, «В» – общий вынос брызг за пределы модели в зависимости от высоты расположения пятисопловой фурмы по вариантам исследования: 1 – без воздействий; 2 – на фурме отрицательная полярность; 3 – положительная

Fig. 1. Change of total quantity of splashes collected by the stores that are located in three model sites (gas pressure before a nozzle is 2 atm.): “А” – in a lance zone, “Б” – along the model wall, “В” – the general slopping of splashes out of the model depending on height of arrangement of five nozzle lance by research options: 1 – without influences; 2 – negative polarity of potential on the lance; 3 – positive polarity

влияние на снижение интенсивности формирования брызг во всем исследованном диапазоне положений фурмы. Причем, отрицательная полярность потенциала наиболее эффективна в зонах «А» и «Б». В то же время, в зоне «В», характеризующей безвозвратные потери с выносами, наиболее сильное влияние на снижение количества потерь оказывает положительная полярность потенциала, подводимая к фурме.

Как было отмечено, подфурменная зона является источником гидро-газодинамических и ряда массообменных процессов при подаче кислорода сверху, определяющих характер и интенсивность разбрызгивания продуваемой среды, но в случае применения маломощного электрического потенциала она также является необходимым звеном в электрической цепи: источник тока – фурма – сталеплавильная ванна, а также местом полезного использования применяемой маломощной электрической энергии [16 – 20]. В связи с этим, особый интерес представляет поиск закономерностей влияния дутьевых параметров на обеспечение максимального уровня выделения электрической энергии в этой зоне, определяемой как «полезная» энергия в общем объеме энергии, затраченной на реализацию электрического воздействия.

Исследования были проведены при регистрации электрических параметров на участке фурма – ванна при использовании стабилизированного источника питания для оцениваемого ряда давлений в пределах каждого эксперимента путем плавного перемещения фурмы по высоте модели в диапазоне от 60 до 0 калибров и при заглублении от 0 до –20 калибров наконечника фурмы в жидкость (отрицательная величина калибров условно принята для характеристики заглубления на-

конечника в жидкость). Выявлено, что диаграммы изменения величины «полезной» электрической энергии на данном участке в зависимости от расположения фурмы относительно поверхности жидкости (рис. 2) носят экстремальный характер.

При опускании фурмы в диапазоне от 60 до 0 калибров, т.е. приближение ее наконечника к поверхности жидкости, отмечено увеличение уровня полезной энергии, а после достижения наибольших значений – ее снижение. С увеличением давления дутья уровень, на котором происходит максимальное выделение полезной энергии, реализуется при более высоких положениях фурмы (см. рис. 2). В частности, при давлении 3 ати максимальный уровень «полезной» энергии соответствовал положению фурмы 18 – 20 калибров. Анализ кривых рис. 2 указывает также на то, что реализация способа использования потенциала затруднительна при высоком размещении наконечника фурмы. Также и в случае погружения наконечника фурмы в жидкость (при перемещении в диапазоне от 0 до –20 калибров) величина полезной энергии существенно снижается.

Анализ влияния давления газа перед соплом в сочетании с уровнем расположения фурмы по высоте модели позволил определить закономерности газодинамического взаимодействия струй газа с жидкостью, отраженные линиями 1 – 3, соединяющими точки минимальных и максимальных значений мощности. Линия 1 отражает верхнюю границу начала проявления влияния потенциала, линия 2 – продувка через фурму с неэффективным режимом электрического воздействия, когда наконечник соприкасается со всплесками металлургического расплава, что сопровождается коротким

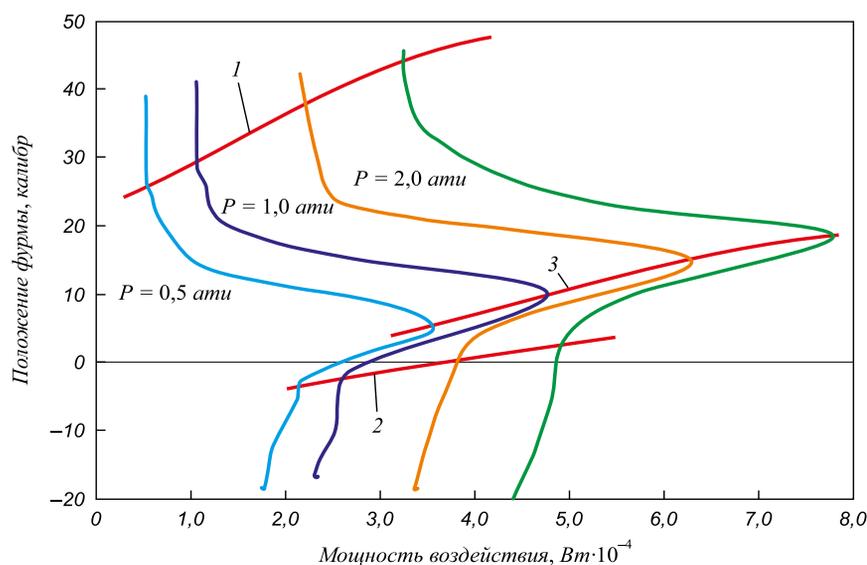


Рис. 2. Влияние положения фурмы и давления газа перед соплом на величину мощности воздействия и на граничные значения высот расположения фурмы по отношению к расплаву, определяющие режимы передачи электрической энергии жидкой ванне (1 – 3 – режимы работы фурмы)

Fig. 2. Influence of the lance position and gas pressures before a nozzle on the power level and boundary values of lance arrangement heights in relation to the melt, defining modes of electric energy transfer to a liquid bath (1 – 3 – operating modes of the lance). See explanation in the text

замыканием системы наложения потенциалов. В таком случае влияние потенциала стремится к нулю, а такая ситуация может привести к прогару наконечника. Рабочий режим перемещения фурмы находится в диапазоне между линиями 1 – 2. Линия 3 отражает положение фурмы, при котором при заданном значении давления возможно наиболее полное осуществимое влияние электрических потенциалов. При работе с положением фурмы выше линии 1 наконечник фурмы потеряет электрический контакт с ванной. Это связано с тем, что выше определенной высоты продуваемая струя не может создавать достаточное количество газо-жидкостной взвеси в подфурменной области в результате инжекции в высокоскоростной поток окружающей атмосферы и капель жидкости, посредством которой осуществляется прохождение электрического тока в цепи фурма – жидкая ванна.

**Выводы.** Выполненные эксперименты путем физического моделирования ЛД-процесса позволили выявить характерные особенности брызгообразования в рабочем объеме модели (в двух характерных зонах: вблизи продувочной фурмы и вблизи стенки модели) и количества брызг, выносимых за пределы модели, что на практике соответствует интенсивности формирования гарнисажа на горловине конвертера и элементах ОКГ. Установлено, что общее количество брызг жидкости, выносимой за пределы модели, носит экстремальный характер в зависимости от уровня расположения фурмы с заметным снижением количества брызг при нулевой высоте ее расположения над жидкостью, а также выше определенных значений. Экспериментально установлено, что независимо от знака полярности потенциала интенсивность разбрызгивания жидкости в изучаемых дифференцированных областях по объему модели снижается. Выявлено, что применение отрицательной полярности в большей степени оказывает влияние на интенсивность брызгообразования в прифурменной и в пристеночной зонах со снижением общей величины разбрызгивания, а применение положительной полярности снижает вынос брызг за пределы модели. Выявлено, что начало практического влияния потенциала и максимальная величина «полезной» энергии, выделяемой в подфурменной зоне, определяются конкретным сочетанием значения давления перед соплом и уровнем положения фурмы: чем выше давление перед соплом, тем выше необходимо располагать фурму для достижения максимальных значений «полезной» энергии, также смещается граница начала проявления электрических воздействий. Выполненные на физической модели эксперименты при продувке солевых водных растворов газами с использованием электрических потенциалов показали возможность расширения области применения разрабатываемого метода на процессы, не связанные с металлургией.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Харахулах В.С., Лесовой В.В., Мельник В.М. Состояние сталеплавильного производства на предприятиях объединения «Металлургпром» и перспектива его развития до 2015 года // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2010. № 7. С. 4 – 9.
2. Охотский В.Б. Гидродинамическая модель конвертера // Изв. вуз. Черная металлургия. 1996. № 3. С. 10 – 14.
3. Чернятевич А.Г., Шишов Б.И. Некоторые вопросы распространения кислородных струй в рабочем пространстве конвертера // Изв. вуз. Черная металлургия. 1981. № 1. С. 28, 29.
4. Чернятевич А.Г., Зарвин Е.Я., Волович М.И. Наблюдение через прозрачную стенку за поведением конвертерной ванны при продувке // Изв. вуз. Черная металлургия. 1975. № 2. С. 37 – 42.
5. Явойский А.В., Тарановский Г.А. Исследование, разработка и применение газовых потоков в конвертерных процессах производства сталей. – В кн.: Проблемы теории и практики сталеплавильного производства. – М.: Металлургия, 1991. С. 126 – 148.
6. Меджибожский М.Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. – Киев: Вища школа, 1979. – 277 с.
7. Баптизманский В.И. Теория кислородно-конвертерного процесса. – М.: Металлургия, 1975. – 376 с.
8. Технология производства стали в современных конвертерных цехах / С.В. Колпаков, Р.В. Старов, В.В. Смяктий, В.И. Лебедев и др. – М.: Машиностроение, 1991. – 464 с.
9. Охотский В.Б., Козаченко Д.А. Выход годного в сталеплавильных процессах. Конвертерное производство // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2006. № 2. С. 17 – 19.
10. Охотский В.Б. Выбросы в конвертерных процессах // Металл и литье Украины. 2013. № 3. С. 26 – 32.
11. Семькин С.И., Поляков В.Ф., Борисов Ю.Н. и др. Применение электрической энергии малой мощности при выплавке стали в конвертерах: Труды первого съезда металлургов, Москва, 12 – 15 ноября 1992 г. – М.: Черметинформация, 1993. С. 55 – 57.
12. Martin M., Rendueles M., Diaz M. Hydrodynamics and mass transfer in steel converters using cold models // Proceedings 5th European Oxygen Steelmaking Conference. 26–28 June 2006, Aachen, Germany. – Dusseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 2006. P. 577 – 580.
13. Martin M., Diaz M. Gas-liquid and gas-liquid-liquid reactors with top and bottom blowing: I. Fluid dynamic regimes // Chemical Engineering Communications. 2002. Vol. 189. Iss. 4. P. 543 – 570.
14. Mats Brämning, Bo Björkman. Avoiding Sloppy BOS Process Behavior / Mats Brämning and Bo Björkman // Iron & Steel Technology. 2010. Vol. 7. No. 11. P. 66 – 75.
15. Brahma Deo, Aart Overbosch, Bert Snoeijer etc. Control of Slag Formation, Foaming, Slopping, and Chaos in BOF // Transactions of the Indian Institute of Metals. 2013. Vol. 66. Iss. 5. P. 543 – 554.
16. Степанов В.П. Межфазные явления в ионных солевых расплавах. – Екатеринбург: Наука, 1993. – 316 с.
17. Степанов Е.М., Дьячков Б.Г. Ионизация в пламени и электрическое поле. – М.: Металлургия, 1968. – 312 с.
18. Ванюков А.В., Кириллин И.И., Зайцев В.Я. Двойной электрический слой на границе раздела металлургических расплавов // Цветные металлы. 1970. № 3. С. 22 – 26.
19. Шаров А.Ф., Степанов В.П. Зависимость между плотностью заряда и скачком потенциала на границе раздела жидких металлов с расплавленными солями: Труды института электрохимии УНЦ АН СССР. 1974. № 21. С. 39 – 43.
20. Семькин С.И. Исследования в 1,5-т конвертере характера окисления примесей чугуна при подведении к сталеплавильной ванне низковольтного потенциала // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. 2005. Вып. 11. С. 96 – 105.

Поступила 19 мая 2016 г.

## STUDY OF THE INTERRELATIONS OF BLOWING PARAMETERS, OPTIONS OF ELECTRIC INFLUENCE AND NATURE OF LIQUID SPRAYING BY PHYSICAL MODELING

**S.I. Semykin, T.S. Golub, E.V. Semykina, S.A. Dudchenko, V.V. Vakul'chuk**

**Institute of Ferrous Metallurgy named after Z.I. Nekrasov, Ukrainian National Academy, Ukraine, Dnepr**

**Abstract.** The main and decisive factor of blowing in oxygen converters is interaction of high-speed oxygen jet with a molten bath. The features of this interaction determine hydrodynamics and level of metal losses with slopping and spitting. Their study is most accessible with cold modeling. The paper presents results of laboratory studies on the physical model of a 160 ton converter manufactured at a scale of 1:30 to study the influence of blowing modes on character of liquid spraying. It is blown through a lance with five nozzle tips at 10 horizons in model height on three zones of working volume of converter model: area near lance, area near the wall and out-of-model area. That in practice corresponds to intensity of formation of skull on the lance, on converter mouth and on elements of the fume gas collecting system. It was found that the total amount of liquid sprays carried out of the model is extreme and depends on level of lance position, with a noticeable decrease in the amount of sprays at zero height above the liquid, and above certain values. The possibility of reducing of the intensity of splashing formation and the level of liquid loss within the investigated zones was determined by applying a low-voltage electric potential: with negative polarity in the area near the lance and near the walls, and with positive polarity – out of the model. It was revealed that beginning of practical influence of the potential and the maximum value of “useful” power allocated in the sublance zone is determined by specific combination of pressure before the nozzle and the level of tip of the lance: the higher the pressure in front of the nozzle is, the higher lance position is needed to reach maximum values of “useful” power. The experiments, conducted on physical model during blowing of saline solutions with gases at using of electric potentials, have shown possibility of extending the scope of developed method to processes not related to metallurgy.

**Keywords:** physical modeling, blowing of liquid bath, five nozzle lance, electric potential.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-10-755-759

### REFERENCES

1. Kharakulakh V.S., Lesovoi V.V., Mel'nik V.M. Condition of steel-smelting production at the enterprises of “Metallurgprom” and prospects of its development till 2015. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2010, no. 7, pp. 4–9. (In Russ.).
2. Okhotskii V.B. Hydrodynamic model of BOF. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1996, no. 3, pp. 10–14. (In Russ.).
3. Chernyatevich A.G., Shishov B.I. Distribution of oxygen streams in working space of BOF. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1981, no. 1, pp. 28, 29. (In Russ.).
4. Chernyatevich A.G., Zarvin E.Ya., Volovich M.I. Observation through the transparent wall over the behavior of converter bath during blowing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1975, no. 2, pp. 37–42. (In Russ.).
5. Yavoiskii A.V., Taranovskii G.A. Research, development and application of gas streams in converter processes of steel production. In: *Problemy teorii i praktiki staleplavil'nogo proizvodstva* [Problems of the theory and practice of steel production]. Moscow: Metallurgiya, 1991, pp. 126–148. (In Russ.).
6. Medzhibozhskii M.Ya. *Osnovy termodinamiki i kinetiki staleplavil'nykh protsessov* [Fundamentals of thermodynamics and kinetics of steel-smelting processes]. Kiev: Vishcha shkola, 1979, 277 p. (In Russ.).
7. Baptizmanskii V.I. *Teoriya kislorodno-konverternogo protsessa* [Theory of BOF process]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 376 p. (In Russ.).
8. Kolpakov S.V., Starov R.V., Smoktii V.V., Lebedev V.I. etc. *Tekhnologiya proizvodstva stali v sovremennykh konverternykh tsekhakh* [Technology of steel production in modern converter shops]. Moscow: Mashinostroenie, 1991, 464 p. (In Russ.).
9. Okhotskii V.B., Kozachenko D.A. Metal yield in steel smelting process. BOF. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2006, no. 2, pp. 17–19. (In Russ.).
10. Okhotskii V.B. Emissions at converter processes. *Metall i lit'e Ukrainy*. 2013, no. 3, pp. 26–32.
11. Semykin S.I., Polyakov V.F., Borisov Yu.N. etc. Application of low power electric energy at steel smelting in converters. In: *Trudy pervogo s'ezda metallurgov, Moskva, 12 – 15 noyabrya, 1992* [Proc. of the 1st Congress of Metallurgists, Moscow, November 12–15, 1992]. Moscow: Chernetinformatsiya, 1993, pp. 55–57. (In Russ.).
12. Martin M., Rendueles M., Diaz M. Hydrodynamics and mass transfer in steel converters using cold models. In: *Proceedings 5th European Oxygen Steelmaking Conference. 26-28 June 2006, Aachen, Germany*. Dusseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 2006, pp. 577–580.
13. Martin M., Diaz M. Gas-liquid and gas-liquid-liquid reactors with top and bottom blowing: I. Fluid dynamic regimes. *Chemical Engineering Communications*. 2002, vol. 189, Iss. 4, pp. 543–570.
14. Mats Brämning, Bo Björkman. Avoiding sloppy BOS process behavior. *Iron & Steel Technology*. 2010, vol. 7, no. 11, pp. 66–75.
15. Brahma Deo, Aart Overbosch, Bert Snoeijer etc. Control of slag formation, foaming, slopping, and chaos in BOF. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2013, vol. 66, Iss. 5, pp. 543–554.
16. Stepanov V.P. *Mezfaznye yavleniya v ionnykh solevykh rasplavakh* [Interphase phenomenon at ionic saline melts]. Ekaterinburg: Nauka, 1993, 316 p. (In Russ.).
17. Stepanov E.M., D'yachkov B.G. *Ionizatsiya v plameni i elektricheskoe pole* [Ionization in flame and electrical field]. Moscow: Metallurgiya, 1968, 312 p. (In Russ.).
18. Vanyukov A.V., Kirillin I.I., Zaitsev V.Ya. Double electric layer at the interface of metallurgical melts. *Tsvetnye metally*. 1970, no. 3, pp. 22–26. (In Russ.).
19. Sharov A.F., Stepanov V.P. Dependence between the charge density and the leap of potential at the interface between liquid metals and molten salts. *Trudy instituta elektrokhimii AN SSSR*. 1974, no. 21, pp. 39–43. (In Russ.).
20. Semykin S.I. Research in 1,5 – t converter of oxidation character of hot metal impurities at imposition of low voltage to the steel smelting bath. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metallurgii*. 2005, no. 11, pp. 96–105. (In Russ.).

### Information about the authors:

**S.I. Semykin**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Department of Steel Metallurgy (isisemykin@gmail.com)

**T.S. Golub**, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Department of Steel Metallurgy (dove@email.ua)

**E.V. Semykina**, Research Associate of the Department of Steel Metallurgy (isisemykin@gmail.com)

**S.A. Dudchenko**, Research Associate of the Department of Steel Metallurgy (s.dudchenko@meta.ua)

**V.V. Vakulchuk**, Junior Researcher of the Department of Steel Metallurgy

Received May 19, 2016

УДК 669.162

## ПРЕИМУЩЕСТВА И РИСКИ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ С ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ

**Загайнов С.А.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Металлургия железа и сплавов» (zagainovsky@mail.ru)

**Филатов С.В.<sup>2</sup>**, управляющий директор (Filatov\_sv@nlmk.com)

**Мясоедов С.В.<sup>2</sup>**, начальник доменного цеха (myasoedov\_sv@nlmk.com)

**Гилева Л.Ю.<sup>1</sup>**, к.т.н., доцент кафедры «Металлургия железа и сплавов» (luy.gileva@urfu.ru)

**Титов В.Н.<sup>2</sup>**, главный специалист по оптимизации руднотермических технологий (titov\_vn@nlmk.com)

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

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

<sup>2</sup> ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат», (НЛМК)

(398004, Россия, г. Липецк, пл. Металлургов, 2)

**Аннотация.** Рост интенсивности плавки на доменных печах ОАО «НЛМК», который достигнут путем повышения качества кокса и железорудных материалов, повышения давления под колошником и обогащении дутья кислородом, сопровождается увеличением скорости косвенного восстановления вюстита и снижением удельных потерь тепла с охлаждающей водой. Однако при высокой интенсивности существенно увеличиваются риски возникновения расстройств схода шихты. Установлено, что наряду с изменением качества шихтовых материалов причиной нарушения схода шихты может служить изменение распределения рудной нагрузки по радиусу печи. Разработан новый метод диагностики причин, которые приводят к расстройству схода шихтовых материалов. С использованием метода математического моделирования выполнен анализ влияния изменения рудной нагрузки и крупности железорудных материалов на изменение температуры периферийных газов и степень использования монооксида углерода. Метод основан на анализе совместного изменения температуры газов и степени использования монооксида углерода в периферийной области. Анализ изменения температуры периферийных газов и степени использования соединения СО позволяет выявлять причины изменения перепадов давления по высоте печи. В результате анализа динамики изменения перепадов давления по высоте печи найдены признаки, по которым можно судить о вероятности расстройства схода шихты. Рассмотрены возможность снижения перепада давления за счет перераспределения рудной нагрузки по радиусу печи и количества газов. Показано, что различные способы снижения количества газов сопровождаются различными изменениями расхода кокса и производительности печи. Разработана математическая модель для выбора наилучшей, в конкретных условиях, комбинации изменения параметров комбинированного дутья.

**Ключевые слова:** доменная печь, интенсивность, степень использования газа, удельный расход углерода топлива, газодинамика, сход шихтовых материалов, перепады давления по высоте печи.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-760-765

Вопрос о влиянии интенсивности плавки, которую целесообразно оценивать по удельной производительности  $P_{уд}$ , т/м<sup>3</sup> в сутки, на эффективность ее работы в настоящее время является весьма актуальным. Это объясняется тем, что в современных условиях при повышении интенсивности плавки наблюдается снижение удельного расхода топлива.

В работе [1] доказано, что рост интенсивности плавки, который достигается путем повышения качества кокса и железорудных материалов, сопровождается увеличением скорости косвенного восстановления вюстита и снижением удельных потерь тепла с охлаждающей водой. При этом доминирующим фактором является снижение потерь тепла, что во многом определяет снижение удельного расхода кокса. Также в работе [1] показано, что при проведении комплекса мероприятий, направленных на повышение интенсивности плавки, достигнуто значительное

снижение удельного расхода кокса, что подтверждается в работах [2 – 4].

Принимая во внимание возрастание требований по снижению эмиссии диоксида углерода в черной металлургии, вклад которой в глобальную эмиссию этого газа техногенного происхождения составляет 7 % [5], энергозатраты на выплавку 1 т чугуна удобно оценивать величиной суммарного расхода углерода.

Оценка изменения этого показателя, полученная по данным о работе доменных печей ОАО «НЛМК» (рис. 1), в полной мере подтвердила преимущества работы доменных печей с высокой интенсивностью.

Риски работы доменных печей, возникающие при высокой интенсивности плавки, в первую очередь связаны с возможными расстройствами схода шихты.

Условия схода шихты определяются взаимодействием сил тяжести и силы газового потока, оцениваются степенью уравновешивания шихты:

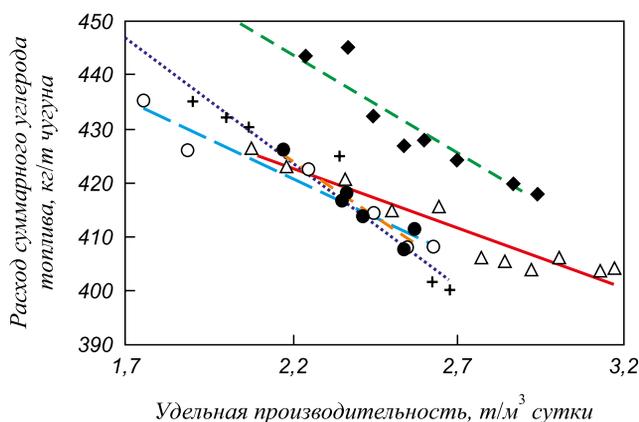


Рис. 1. Зависимость расхода суммарного углерода топлива от удельной производительности доменной печи:  
 + – ДП 3; Δ – ДП 4; ○ – ДП 5; ● – ДП 6; ◆ – ДП 7

Fig. 1. Dependence of total fuel carbon consumption on specific productivity of the blast furnace – BF (blast furnace):  
 + – BF 3; Δ – BF 4; ○ – BF 5; ● – BF 6; ◆ – BF 7

$$C_y = \frac{\Delta P}{\rho g h}, \quad (1)$$

где  $\Delta P$  – перепад давления на высоте  $h$  слоя, Па;  $\rho$  – насыпная масса шихты, кг/м<sup>3</sup>.

При высокой интенсивности плавки печи работают с предельно допустимыми перепадами давления.

Учитывая, что давление в каждом горизонтальном сечении печи постоянно [6], а распределение рудной нагрузки по радиусу и, следовательно, насыпная масса отличаются, можно утверждать, что характер схода шихты определяется степенью ее уравнивания в критической области, которой могут являться периферийная или осевая зоны.

Взаимосвязь между перепадом давления в верхней и нижней зонах печи и режимными параметрами описывается уравнением Эргона [7]:

$$\Delta P = \lambda \frac{h}{d} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{T}{T_0} \frac{P_0}{P} \frac{\rho_0 w_0^2}{2}; \quad (2)$$

здесь  $\lambda$  – коэффициент, учитывающий поверхностные свойства кусков;  $d$  – эквивалентный диаметр кусков слоя, м;  $\varepsilon$  – порозность слоя (относительный объем межкускового пространства в слое), м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $T$  и  $T_0$  – средняя температура газа в слое и при нормальных условиях, К;  $P$  – среднее давление газа в слое, Па;  $\rho_0$  – плотность газа при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>;  $w_0$  – средняя скорость газа в свободном сечении печи при нормальных условиях, м/с.

Следует отметить, что протяженность зоны, где измеряется верхний перепад давления, составляет от 30 до 48 % от уровня засыпи до уровня фурм. Протяженность сухой зоны печи значительно больше и согласно расчетам температурных полей, выполненных по уравнениям работы [8], доходит до 70 % расстояния от

уровня засыпи до уровня фурм. Из этого следует, что перепад давления в сухой зоне печи контролируется не в полной мере.

Классические расстройтва схода шихты, а также способы их ликвидации достаточно подробно описаны в работах [9, 10]. Основные способы ликвидации расстройств схода шихтовых материалов связаны со снижением количества газов и перераспределением рудной нагрузки по радиусу печи.

Основными причинами расстройств схода шихтовых материалов является следующее:

- несоответствие рудной нагрузки, программы загрузки и параметров комбинированного дутья качеству шихтовых материалов;
- сбои и отказы работы оборудования;
- ошибки технологического персонала.

Диагностика причин, которые приводят к расстройству схода шихтовых материалов, осуществляется путем анализа совместного изменения температуры газов и степени использования монооксида углерода в периферийной области.

На основе закономерностей теплообмена [11] и особенностей восстановления железорудных материалов [12] выполнен расчет изменения степени использования монооксида углерода и температуры газов в периферийной области верхней зоны доменной печи. Расчеты выполняли при условии, что рудная нагрузка в периферийной области составляет 2 – 3 т/т, а эквивалентный diam. железорудных материалов – 5 мм.

Расчеты показали, что при увеличении рудной нагрузки в периферийной области на 0,1 т/т температура газов снижается на 10 – 16 °С, а степень использования монооксида углерода снижается на 0,12 – 0,18 %. При снижении эквивалентного диаметра железорудных материалов на 1 мм степень использования соединения СО возрастает на 0,3 – 0,5 %, а температура газов снижается на 6 – 10 °С. Таким образом, однонаправленное изменение температуры периферийных газов и степени использования монооксида углерода свидетельствует об изменении распределения рудной нагрузки по радиусу печи, а разнонаправленное изменение этих параметров – об изменении качества шихтовых материалов.

Рассматривая возможность снижения перепада давления за счет перераспределения рудной нагрузки по радиусу печи, следует отметить, что это мероприятие приводит к снижению степени использования соединения СО, повышению степени прямого восстановления и удельного расхода кокса.

Горячий ход печи и низкое качество шихтовых материалов могут служить причинами тугого хода.

Тугой ход при нормальном нагреве печи – это нормальная работа печи при существующем качестве шихтовых материалов. Одним из способов повышения интенсивности плавки в этом случае является снижение рудной нагрузки в периферийной области. При этом за

счет повышения количества газов на периферии высота верхней зоны печи сокращается и повышаются тепловые нагрузки на холодильники распара и заплечиков. При сильном раскрытии периферии возможно оползание гарнисажа, что может усугубить расстройство. Поэтому наряду с раскрытием периферии следует снизить количество газов за счет снижения расхода природного газа и содержания кислорода в дутье. Для компенсации снижения степени использования монооксида углерода и снижения расхода природного газа снижается рудная нагрузка, что способствует увеличению порозности слоя шихты.

Для предотвращения расстройства при горячем ходе печи на практике в первую очередь реализуются мероприятия, направленные на стабилизацию теплового состояния.

С использованием математической модели, разработанной в УрФУ [13], выполнен анализ эффективности снижения верхнего перепада давления путем одновременного изменения рудной нагрузки на периферии, снижения расхода природного газа и содержания кислорода в дутье. Результаты расчета показали, что для снижения верхнего перепада давления на 0,01 ата на печах, оборудованных бесконусным засыпным устройством, удельный расход кокса увеличится на 1,0 – 2,0 кг на т чугуна, а производительность печи снизится менее чем на 1 %.

Для предотвращения и ликвидации нарушения схода шихты реализуются такие изменения параметров комбинированного дутья, при которых снижается минутное количество газов. При снижении количества газов происходит одновременное снижение как верхнего, так и нижнего перепадов давления. Причем на каждой доменной печи эта взаимосвязь индивидуальна. Результаты расчета взаимосвязи между изменением верхнего и нижнего перепадов давления представлены на рис. 2.

Различный характер зависимости между изменением верхнего и нижнего перепадов давления по

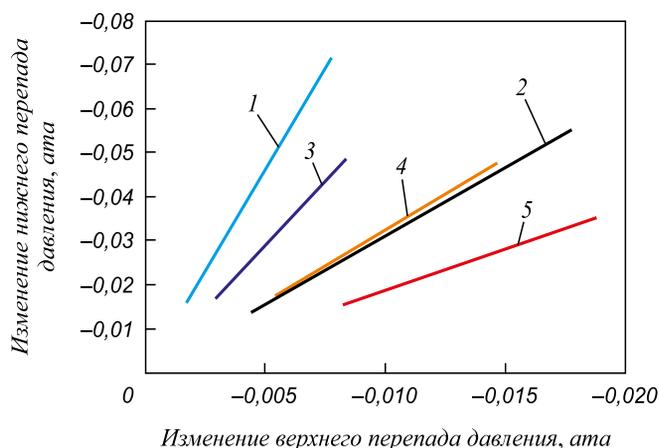


Рис. 2. Взаимосвязь изменения верхнего и нижнего перепадов давления при снижении количества газов:  
1 – ДП 3; 2 – ДП 4; 3 – ДП 5; 4 – ДП 6; 5 – ДП 7

Fig. 2. Relation between changes in upper and lower pressure drops at decrease in the gases volume:  
1 – BF 3; 2 – BF 4; 3 – BF 5; 4 – BF 6; 5 – BF 7

печах объясняется различным отношением верхнего перепада давления к нижнему. Чем больше это отношение, тем в меньшей степени отличаются их изменения.

Рассматривая варианты ликвидации неровного схода шихты или схода ее с подвисаниями и обрывами, следует отметить, что наиболее эффективный способ борьбы с такими расстройствами связан с сокращением количества газов. Это достигается изменением параметров комбинированного дутья.

Сопоставление основных приемов снижения верхнего перепада давления на 0,01 ата для доменных печей ОАО «НЛМК» представлено в таблице. В ней приводятся средние изменения производительности и удельного расхода кокса. Диапазон изменения этих показателей в технологических эффективных режимах составляет ±10 % (отн.).

**Сопоставление основных приемов снижения верхнего перепада давления на 0,01 ата для доменных печей ОАО «НЛМК»**

**Comparison of the main methods of reducing the upper pressure drop by 0.1 kPa for NLMK blast furnaces**

Мероприятия	ДП 3	ДП 4	ДП 5	ДП 6	ДП 7
Снижение содержания кислорода в дутье	–	<u>-2,1</u> -8,5	<u>-5,5</u> -8,2	<u>-5,74</u> -10,73	<u>-3,5</u> -7,0
Снижение расхода дутья	<u>-3,2</u> -4,8	<u>-1,13</u> -1,93	<u>-1,56</u> -1,38	<u>-1,90</u> -2,16	<u>-0,82</u> -1,37
Снижение расхода природного газа	<u>+1,65</u> +18,26	<u>-0,72</u> +8,50	<u>+0,54</u> +9,70	<u>+0,6</u> +8,9	<u>+0,27</u> +5,50
Изменение расхода природного газа и содержания кислорода в дутье при постоянной теоретической температуре фурменного газа	<u>-4,75</u> -0,50	<u>-2,6</u> 0	<u>-2,6</u> 0	<u>-2,50</u> -0,64	<u>-1,7</u> 0

Примечание. В числителе приведены значения изменения производительности, %, в знаменателе – изменения удельного расхода кокса, кг/т чугуна.

Приведенные в таблице данные показывают, что снижение расхода дутья в меньшей степени сказываются на изменении производительности печи и тепловом состоянии, так как для сохранения теплового состояния требуется меньшее изменение удельного расхода кокса. При реализации этого мероприятия наблюдается снижение протяженности фурменного очага.

Минимальное изменение производительности достигается при снижении расхода природного газа. Однако при реализации этого мероприятия требуется существенно увеличить расход кокса.

Снижение перепада давления путем совместного изменения расхода природного газа и содержания кислорода в дутье менее эффективно с точки зрения потери производства. Однако при использовании этого мероприятия сохраняется структура столба шихтовых материалов, так как рудная нагрузка практически не меняется.

В зависимости от конкретной ситуации в доменном цехе реализуется то или иное мероприятие. Для выбора конкретного мероприятия разработано специальное математическое обеспечение.

Анализ показал, что в тех случаях, когда нижний перепад давления приближается к критическому значению, наиболее эффективным мероприятием является снижение расхода дутья.

При высокой интенсивности плавки возникают ситуации, когда при практически постоянном темпе срабатывания подачи и уровне засыпи происходит обрыв шихты на 2 – 4 м. Анализ информации об изменениях перепадов давления, составе колошникового газа, расходе и давлении дутья, температурах периферийных газов и газов в газоотводах, усредненной на интервале времени 5 с более чем за 50 периодов работы печи при возникновении обрывов, позволил выявить признаки, на основе которых возможно предсказать приближающийся обрыв. Более чем в 40 периодах обрыву предшествовало разнонаправленное изменение верхнего и нижнего перепадов давления. При увеличении верхнего перепада нижний перепад снижался. Типичная картина изменения динамики перепадов давления по высоте печи приводится на рис. 3.

При возникновении обрывов шихты наблюдается похолодание печи, которое обусловлено снижением времени пребывания шихты в зоне косвенного восстановления вюстита.

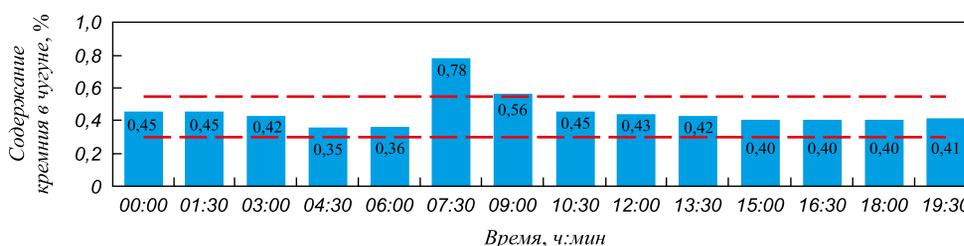


Рис. 4. Пример расчета динамики изменения содержания кремния в чугуне при обрыве шихты и загрузке в печь двух холостых подач

Fig. 4. An example of calculating the dynamics of change in silicon content in cast iron when there is burst of charge and two idle feeds are charged into the furnace

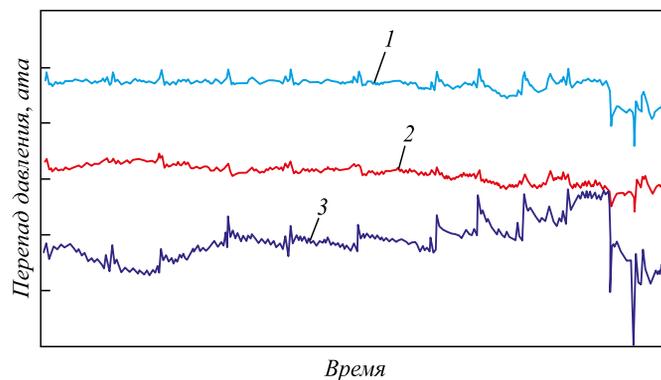


Рис. 3. Типичная картина изменения перепадов давления по высоте печи перед «внезапным» обрывом шихты: 1 –  $\Delta P$  общий; 2 –  $\Delta P$  нижний; 3 –  $\Delta P$  верхний

Fig. 3. Typical changes in pressure drops along the furnace height before the “sudden” burst of charge : 1 –  $\Delta P$  total; 2 –  $\Delta P$  lower; 3 –  $\Delta P$  upper

Используя математические модели для оценки влияния времени пребывания шихты в печи на степень использования монооксида углерода [14] и температурных полей в верхней зоне печи [7, 8, 15, 16] и известные подходы к математическому описанию динамических характеристик [17 – 23], разработана компьютерная методика моделирования динамики изменения содержания кремния в чугуне при компенсации обрывов с использованием холостых подач и параметров комбинированного дутья.

Методика реализована в виде программного модуля, который позволяет в диалоговом режиме выбирать такой комплекс воздействий, при котором сокращается время восстановления уровня засыпи и минимизируется количество выпусков с некондиционным чугуном.

Пример расчета динамики изменения содержания кремния в чугуне при обрыве шихты и использовании холостых подач представлен на рис. 4.

**Выводы.** Установлено, что при повышении интенсивности плавки снижается удельный расход суммарного углерода топлива. При высокой интенсивности плавки возникают риски превышения перепадов давления критических значений. Рассмотрены способы снижения перепада давления путем изменения расхода дутья, содержания кислорода в дутье и расхода природного газа.

Показано различное влияние этих параметров на производительность печи и удельный расход кокса. Разработано программное обеспечение, позволяющее выбрать такие управляющие воздействия, применение которых в конкретной ситуации обеспечивает наименьшие потери.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курунов И.Ф., Филатов С.В., Тихонов Д.Н., Басов В.И. Интенсивность доменной плавки и эффективность косвенного восстановления // *Сталь*. 2016. № 8. С. 26 – 31.
2. Готлиб А.Д. Доменный процесс. – М.: Металлургия, 1966. – 503 с.
3. Товаровский И.Г., Лялюк В.П. Эволюция доменной плавки. – Днепропетровск: Пороги, 2001. – 424 с.
4. Товаровский И.Г., Бондаренко В.И. Интенсивность хода и удельный расход кокса в современных и перспективных условиях доменной плавки // *Сталь*. 1978. № 3. С. 203 – 206.
5. Adeline Morcel, Lena Sundqvist Okvist, Joel Orre, Bo Bjorkman, Per Lagrerwall. Low CO<sub>2</sub> Ironmaking in the Blast Furnace. Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC 2016. – 2016. P. 274 – 283.
6. Тарасов В.П. Газодинамика доменного процесса. – М.: Металлургия, 1990. – 215 с.
7. Китаев Б.И., Ярошенко Ю.Г., Лазарев Б.Д. Теплообмен в доменной печи. – М.: Металлургия, 1966. – 355 с.
8. Теплотехника доменного процесса / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов и др. – М.: Металлургия, 1978. – 248 с.
9. Металлургия чугуна: Учеб. для вузов., 3-е изд. перераб. и доп. / Под ред. Ю.С. Юсфина. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
10. Основы теории и технологии доменной плавки / А.Н. Дмитриев, Н.С. Шумаков, Л.И. Леонтьев, О.П. Онорин. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 545 с.
11. Теплообмен и повышение эффективности доменной плавки / Н.А. Спиринов, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко; под ред. Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 1995. – 243 с.
12. Zagainov S.A., Filatov S.V., Gileva L.Y., Lozovich A.V., Jimoh S.O. Controlling the peripheral temperature of the blast furnace // *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46. No. 6. P. 378 – 383.
13. Разработка структурированного математического обеспечения для решения комплекса технологических задач организации и управления доменным процессом / Л.Ю. Гилева, С.А. Загайнов, В.Н. Титов, А.В. Галкин. – В кн.: Современные сложные системы управления. Материалы XII Международной научно-практической конференции. Т. 1. – Липецк: изд. Липецкого государственного технического университета, 2017. С. 205 – 209.
14. Korshikov G.V., Titov V.N., Mikhailov V.G., Karpov A.V. Fuel consumption and reduction kinetics in blast furnaces // *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46. No. 2. P. 125 – 131
15. Bokovikov B.A., Moikin V.I., Gordon Y.M., Spirin N.A., Shvidkii V.S., Yaroshenko Y.G., Lavrov V.V. Analysis of Transient Processes in Blast Furnace. AISTech Proceedings. 4 – 7 May 2015 – Cleveland. Oh. USA, 2015. P. 237 – 244.
16. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спиринов, В.Л. Терентьев и др. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2005. – 301 с.
17. Улахович В.А., Райх Е.И., Шоленинов В.М. и др. Исследование динамики доменного процесса // *Сталь*. 1975. № 1. С. 9 – 14.
18. Похвиснев А.Н., Курунов И.Ф., Завидонский В.А. и др. Экспериментальное определение динамических характеристик доменной печи. – В кн.: Подготовка доменного сырья к плавке: сб. трудов МИСиС. № 69. – М.: Металлургия, 1971. С. 118 – 121.
19. Авдеев В.П., Даниелян Т.М., Белоусов П.Г. Идентификация промышленных объектов с учетом нестационарностей и обратных связей. – Новокузнецк: изд. СМИ, 1984. – 88 с.
20. Kurunov I.F., Dobroskok V.A., Isteev A.I., Fursova L.A., Pleshkov V.I., Shcherbakov P.I. Determining dynamic characteristics of 5000 m<sup>3</sup> blast furnace // *Steel USSR*. 1977. Vol. 7. No. 9. P. 496 – 497.
21. Serov V.V., Mikhalevich A.G. The Dynamics of the quality of pig iron in blast furnaces // *Metallurgist*. 1983. No. 1. P. 14 – 17.
22. Jun-ichiro Y. Matematical model of blast furnace, Progress and Application to New Technology Development, 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking. – Rio de Janeiro, Brazil, 2012. P. 1660 – 1673.
23. Flierman G.A., Oderkerk H. Numerical simulation of the blast furnace process, *Math. Process Models, Iron and Steelmak.* – Amsterdam, 1973. P. 40 – 50, London, Discussion, 1975. P. 37 – 50.

Поступила 7 сентября 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 10, pp. 760–765.

## BENEFITS AND RISKS OF BLAST FURNACES WITH HIGH INTENSITY

S.A. Zagainov<sup>1</sup>, S.V. Filatov<sup>2</sup>, S.V. Myasoedov<sup>2</sup>, L.Yu. Gileva<sup>1</sup>, V.N. Titov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>JSC “Novolipetsk Metallurgical Plant” (NLMK), Lipetsk, Russia

**Abstract.** Increase in the intensity of blast furnace smelting at NLMK JSC is achieved by improving quality of coke and iron ore materials, by increasing pressure under the blast furnace mouth and by oxygen enrichment. It is accompanied by an increase in the rate of wustite indirect reduction and decrease in specific heat losses with cooling water. However, the risks of burden yield problems are significantly lower with high intensity. It has been established that with the change in quality of charge materials, reason for burden yield problems can be also the variation in ore load ratio along the furnace radius. A new method for diagnosing causes of burden yield problems was developed. Using method of mathematical modeling, effect of change in ore load and size of iron-ore materials on peripheral gases temperature change and the degree of CO use were analyzed. The method is based on analysis of joint change in gas temperature and degree of CO use in peripheral area. Analysis of

peripheral gases temperature variation and degree of CO use makes it possible to identify reasons of pressure drops along the furnace height. As a result of analysis of pressure drops dynamics changes along the furnace height, there have been found signs that can be used to judge the probability of burden yield problems. The possibility of reducing pressure drops due to redistribution of ore load along the furnace radius and the amount of gases is considered. It is shown that various methods of reducing the amount of gases are accompanied by different changes in coke consumption and furnace productivity. Mathematical model has been developed to select the best combination of parameters changing of the fuel-enriched blast in specific conditions.

**Keywords:** blast furnace, intensity, degree of gas use, specific fuel carbon consumption, gas dynamics, burden yield, pressure differences along the furnace height.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-760-765

### REFERENCES

1. Kurunov I.F., Filatov S.V., Tikhonov D.N., Basov V.I. Indirect reduction in blast-furnace smelting. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 8, pp. 583–588.

2. Gotlib A.D. *Domennyi protsess* [Blast furnace process]. Moscow: Metallurgiya, 1966, 503 p. (In Russ.).
3. Tovarovskii I.G., Lyalyuk V.P. *Evolutsiya domЕННОй plavki* [Evolution of blast furnace smelting]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2001, 424 p. (In Russ.).
4. Tovarovskii I.G., Bondarenko V.I. Intensity of course and specific consumption of coke in modern and advanced conditions of blast furnace smelting. *Stal'*. 1978, no. 3, pp. 203–206. (In Russ.).
5. Adeline Morcel, Lena Sundqvist Okvist, Joel Orre, Bo Bjorkman, Per Lagrerwall. Low CO<sub>2</sub> Ironmaking in the Blast Furnace. In: *Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC 2016*, pp. 274–283.
6. Tarasov V.P. *Gazodinamika domENNogo protsessa* [Gas dynamics of blast furnace process]. Moscow: Metallurgiya, 1990, 215 p. (In Russ.).
7. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Lazarev B.D. *Teploobmen v domЕННОй pechi* [Heat exchange in blast furnace]. Moscow: Metallurgiya, 1966, 355 p. (In Russ.).
8. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Sukhanov E.L. etc. *Teplotekhnika domENNogo protsessa* [Heat engineering of blast furnace process]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 248 p. (In Russ.).
9. *Metallurgiya chuguna: Ucheb. dlya vuzov* [Cast iron metallurgy: Proc. for universities]. Yusfin Yu.S. ed. Moscow: Akademkniga, 2004, 774 p. (In Russ.).
10. Dmitriev A.N., Shumakov N.S., Leont'ev L.I., Onorin O.P. *Osnovy teorii i tekhnologii domЕННОй plavki* [Fundamentals of theory and technology of blast furnace smelting]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2005, 545 p. (In Russ.).
11. Spirin N.A., Ovchinnikov Yu.N., Shvydkii V.S., Yaroshenko Yu.G. *Teploobmen i povyshenie effektivnosti domЕННОй plavki* [Heat transfer and increasing efficiency of blast furnace smelting]. Yaroshenko Yu.G. ed. Ekaterinburg: UGTU–UPI, 1995, 243 p. (In Russ.).
12. Zagainov S.A., Filatov S.V., Gileva L.Y., Lozovich A.V., Jimoh S.O. Controlling the peripheral temperature of the blast furnace. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 6, pp. 378–383.
13. Gileva L.Yu., Zagainov S.A., Titov V.N., Galkin A.V. Development of structured software for solving a set of technological problems of organizing and managing of blast furnace process. In: *Sovremennye slozhnye sistemy upravleniya. Materialy XII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, t. 1* [Modern Complex Control Systems. Materials of 12th Int. Sci.-Pract. Conf. Vol. 1]. Lipetsk: izd. Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2017, pp. 205–209. (In Russ.).
14. Korshikov G.V., Titov V.N., Mikhailov V.G., Karpov A.V. Fuel consumption and reduction kinetics in blast furnaces. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 2, pp. 125–131.
15. Bokovikov B.A., Moikin V.I., Gordon Y.M., Spirin N.A., Shvidkii V.S., Yaroshenko Y.G., Lavrov V.V. Analysis of Transient Processes in Blast Furnace. *AISTech Proceedings. 4 – 7 May 2015*. Cleveland. Oh. USA. P. 237–244.
16. Onorin O.P., Spirin N.A., Terent'ev V.L. etc. *Komp'yuternye metody modelirovaniya domENNogo protsessa* [Computer simulation of blast furnace process]. Ekaterinburg: UGTU–UPI, 2005, 301 p. (In Russ.).
17. Ulakhovich V.A., Raikh E.I., Sholeninov V.M. etc. Study of the dynamics of blast furnace process. *Stal'*. 1975, no. 1, pp. 9–14. (In Russ.).
18. Pokhvisnev A.N., Kurunov I.F., Zavidonskii V.A. etc. Experimental determination of dynamic characteristics of blast furnace. In: *Podgotovka domENNogo syr'ya k plavke: Sb. trudov MISiS* [Preparation of blast furnace materials for smelting: Coll. of MISiS proc.]. Moscow: Metallurgiya, 1971, no. 69, pp. 118–121. (In Russ.).
19. Avdeev V.P., Danielyan T.M., Belousov P.G. *Identifikatsiya promyshlennykh ob'ektov s uchetom nestatsionarnosti i obratnykh svyazei* [Identification of industrial facilities with regard to nonstationarity and feedback]. Novokuznetsk: SMI, 1984, 88 p. (In Russ.).
20. Kurunov I.F., Dobroskok V.A., Isteev A.I., Fursova L.A., Pleshkov V.I., Shcherbakov P.I. Determining dynamic characteristics of 5000 m<sup>3</sup> blast furnace. *Steel USSR*. 1977, vol. 7, no. 9, pp. 496–497.
21. Serov V.V., Mikhalevich A.G. Dynamics of formation of the composition of conversion pig iron in blast furnaces. *Metallurgist*. 1983, vol. 27, no. 1, pp. 9–13.
22. Jun-ichiro Y. Mathematical model of blast furnace, Progress and Application to New Technology Development, *6th Int. Congress on the Science and Technology of Ironmaking, Rio de Janeiro, Brazil*, 2012, pp. 1660–1673.
23. Flierman G.A., Oderkerk H. Numerical simulation of the blast furnace process. *Math. Process Models, Iron and Steelmak*. Amsterdam, 1973, pp. 40–50; London, Discussion, 1975, pp. 37–50.

**Information about the authors:**

**S.A. Zagainov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Metallurgy of Iron and Alloys” (zagainovsky@mail.ru)

**S.V. Filatov**, Managing Director (Filatov\_sv@nlmk.com)

**S.V. Myasoedov**, Head of the Blast Furnace Shop (myasoedov\_sv@nlmk.com)

**L.Yu. Gileva**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallurgy of Iron and Alloys” (luy.gileva@urfu.ru)

**V.N. Titov**, Chief Specialist in Optimization of Ore-Thermal Technologies (titov\_vn@nlmk.com)

Received September 7, 2018

УДК 669.162.:519.25

**ОЦЕНКА НЕРАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ШИХТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ\*****Сибгатуллин С.К.**, д.т.н., профессор кафедры технологий металлургии  
и литейных процессов (10skt@mail.ru)**Харченко А.С.**, к.т.н., доцент кафедры технологий металлургии  
и литейных процессов (as.mgtu@mail.ru)**Девятченко Л.Д.**, к.т.н., доцент кафедры математики (devyatleo@mail.ru)Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова  
(455000, Россия, Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

**Аннотация.** В различных отраслях производства неравномерность распределения материальных и энергетических ресурсов существенно влияет на стабильность технологического процесса и снижает качество выпускаемой продукции. В частности в доменном производстве неравномерность распределения материалов шихты и температуры газов существенно влияет на технико-экономические показатели работы печи. Анализ библиографических источников показал, что для оценки неравномерности обычно использовались различные коэффициенты, учитывающие изменчивость материальных и энергетических ресурсов в процессе производства продукции. Наибольшее распространение получил коэффициент вариации, введенный К. Пирсоном еще в 1895 г. Установлена связь квадрата коэффициента вариации  $V^2$  и величины  $X^2 = \frac{n(N-1)}{N} V^2$ , согласно которой случайная величина  $V^2$  имеет  $\chi_k^2$  распределение с  $k$  степенями свободы,  $k = N - 1$ , где  $n = n_1 + n_2 + \dots + n_N$ ,  $n_i$  – значение  $i$ -го измерения,  $i = \overline{1, N}$ ,  $N$  – число измерений. Предлагаемая методика оценки неравномерности основана на статистиках  $\chi_k^2$  и  $X^2$ , так же введенных К. Пирсоном соответственно в 1901 и 1904 гг. Последняя из них предназначалась для проверки гипотезы  $H_0$ -соответствия эмпирического и статистического распределений. Методика определения окружной неравномерности распределения материалов и газов в доменной печи основана на согласованности  $\chi_k^2$  и  $X^2$  статистик Пирсона с помощью так называемого квантильного множителя  $q$ , если в расчетах  $X^2$  используется по аналогии не частоты измеряемых величин, а значения самих физических величин. В данной методике  $X^2$ -статистику после коррекции применили для определения меры отклонения ( $p$ ) от равномерного распределения, т. е. вычислили коэффициент неравномерности  $p = p(\chi_k^2)$ ,  $p \in (0; 1 - \alpha)$ ,  $\chi_k^2 = X_{\text{кор}}^2 = qX^2$ . Для согласования статистик  $X^2$  и  $\chi_k^2$  при измерениях физических величин (температура, давление) или материалов (сыпучих, газообразных)  $X^2$ -статистику необходимо корректировать так, чтобы  $qX_{\text{max}}^2 \approx \chi_k^2(\alpha)$ ,  $X_{\text{max}}^2 \subset (X_1^2, \dots, X_M^2)$ , где  $M$  – число экспериментов, для которых определялись значения  $X^2$ -статистики;  $\chi_k^2(\alpha)$  – верхняя  $\alpha$ -квантиль  $\chi_k^2$  статистики;  $q$  – квантильный множитель, вводимый для коррекции значений  $X^2$ -статистик;  $X_{\text{max}}^2$  – предельное значение  $X^2$ -статистики, допустимое для определения меры неравномерности. Методика апробирована для оценки относительной неравномерности компонентов загружаемой шихты и распределения окружной температуры на доменных печах ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» объемом 2014 и 1370 м<sup>3</sup>. Выявлено влияние последовательности набора компонентов шихты в бункер бесконусного загрузочного устройства печей на коэффициент окружной неравномерности материалов и технико-экономические показатели плавки.

**Ключевые слова:** доменная печь, статистика соответствия, методика определения неравномерности распределения шихтовых материалов и газов, температура газа по окружности.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-766-773

Для работы доменной печи с высокой производительностью и низким удельным расходом кокса необходимо обеспечивать равномерное окружное распределение материалов [1 – 3] и газов [4 – 6]. В производственных условиях ровность хода печи по окружности оценивают разностью между максимальной и минимальной температурами. В этом случае используется информация о тепловом состоянии печи в двух секторах. При этом число термопар, по которым можно оперативно оценивать распределение материалов и газов по окружности, на некоторых печах ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК) достигает 8, а на других заводах

и до 16 [7]. Равномерность распределения материалов в зонах со средними температурами также имеет существенное влияние на технико-экономические показатели плавки. В связи с этим в работе [8] был введен коэффициент неравномерности  $\Phi$ , учитывающий среднюю величину измеряемого признака  $B$ :

$$\Phi = \frac{B_{\text{max}} - B_{\text{min}}}{B_{\text{cp}}} \quad (1).$$

Данную формулу применяли для выявления окружной неравномерности распределения материалов на колошнике печи по рудной нагрузке, массе и объему [9]. Однако на практике затруднительно оперативно

\* Результаты получены в рамках государственного задания Минобрнауки России № 11.8979.2017/БЧ.

определять массу или объем материала в секторах по окружности колошника. Применение ее для температур периферийных газов в разные периоды измерения (А и Б) показало, что при равенстве коэффициента  $\Phi$ , равного 0,551 (табл. 1), величина среднеквадратического отклонения  $\sigma$  отличалась на 14,2 %. Наиболее равномерное распределение температуры периферийного газа было в периоде Б по сравнению с периодом А, на что указывает значение  $\hat{\sigma}$ , а также температурный градиент. В связи с этим, при оценке неравномерности распределения материалов и газов по окружности колошника целесообразнее использовать среднеквадратическое отклонение, чем линейный коэффициент  $\Phi$  [10 – 13].

В различных отраслях производства для оценки неравномерности распределения наиболее широко применяют коэффициент вариации [14]

$$V = \frac{1}{\bar{n}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (n_i - \bar{n})^2}{N - 1}}, \quad (2)$$

где  $n_i$  – значение случайной величины в  $i$ -ом опыте;  $\bar{n}$  – среднее арифметическое содержание компонента в пробах;  $N$  – число проб.

Коэффициент вариации подобного вида был предложен К. Пирсоном в 1895 г. Применительно к доменному производству его использовали для выявления неравномерности поступления компонентов железорудной части шихты из бункера бесконусного загрузочного устройства лоткового типа в колошниковое пространство печи [15], а также для оценки окружного распределения материалов в доменной печи по показаниям периферийных термопар [12]. Коэффициент вариации является безразмерной величиной и не зависит от среднего результата. Однако он имеет непостоянные границы, что затрудняет использование его в качестве меры неравномерности распределения исследуемых материалов. Кроме этого, коэффициент вариации  $V$  не дает ответа, какое его значение следует признать как не отвечающее равномерности и с какой надежностью  $p = 1 - \alpha$  подтверждается этот вывод.

В работе [16] предложен метод оценки равномерности распределения компонентов смеси, алгоритм которого основан на кластеризации  $k$ -средних [17 – 19],

который реализован для оценки равномерности распределения смеси в двухкомпонентных средах на основе прикладного пакета MATLAB. Выполнение процедуры кластеризации требует отбора проб смеси и распределение ее равномерным слоем на ровной поверхности для последующего фотографирования или сканирования, чтобы затем провести компьютерную обработку изображения, представив его в виде области (матрицы)  $S_{i,j}$ ,  $i = 1, N, j = 1, M$ , где  $M$  и  $N$  заданное число строк и столбцов соответственно. После компьютерного распознавания компонент смеси на основе анализа точек (пикселей), характеризующих световые (цветовые) свойства компонент, вычисляют коэффициент равномерности распределения для каждой компоненты смеси по формуле, в основу которой положена вариация пикселей относительно общей средней для исследуемой компоненты.

При всех достоинствах данного метода, использование его в условиях доменного производства не представляется возможным из-за трудоемкости отбора и подготовки проб смеси для получения световой (цветовой) матрицы изображения, где на фотографиях часто присутствуют различные артефакты, такие как тени, размытые границы, значительные изменения оттенков смесей и т. д.

В работе [20] равномерность распределения легирующего элемента оценивали по средневзвешенной дисперсии относительных интенсивностей и сравнения ее с табличными значениями  $F$ -распределения. Метод был апробирован и рекомендован для твердых образцов металла, содержащих легирующий элемент. Использовался анализ спектральных линий образцов металла, а затем определялась средневзвешенная дисперсия относительных интенсивностей. Далее на основе полученной  $F$ -статистики Фишера оценивали неравномерность распределения легирующего элемента в образце металла. Очевидно, что метод, рекомендованный для специально подготовленных образцов легированного металла, недоступен для сыпучих материалов и газов, присутствующих в доменной печи.

Таким образом, возникла необходимость разработки методики определения коэффициента равномерности распределения шихтовых материалов по окружности доменной печи.

Таблица 1

### Окружное распределение температур периферийного газа на доменной печи ОАО «ММК»

Table 1. Circumference distribution of peripheral gas temperature at the blast furnace of OJSC «MMK»

Номер периода	Температура периферийного газа под газоотводами, °С								$\Phi$	$\hat{\sigma}$
	1	2	3	4	5	6	7	8		
А	155	168	153	90	126	106	104	109	0,551	28,8
Б	145	162	150	87	127	119	110	111	0,551	24,7

Предварительно следует обратить внимание на коэффициент вариации, как отношения эмпирического стандарта  $S$  к среднему результату  $\bar{x}$  измеряемой величины  $X$ , который можно применить для оценки неравномерности распределения шихтовых материалов на колошнике доменной печи через изменение температур периферийных газов по окружности в  $i$ -точках,  $i = \overline{1, N}$ . Коэффициент вариации  $V = S/\bar{x}$  зависит от величины  $S^2$ , которая имеет несимметричную доверительную оценку:

$$P = \left\{ \frac{KS^2}{\chi_k^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)} < \sigma^2 < \frac{KS^2}{\chi_k^2\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)} \right\} = 1 - \alpha, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – уровень значимости;  $\chi_k^2$  – статистика Пирсона для  $k = N - 1$  степеней свободы [21, 22].

Применительно к оценке неравномерности окружного распределения материалов в доменной печи, при измерении температуры газа на периферии в верхней части доменной печи будем использовать следующие обозначения:  $n_i$  – замеряемая температура газа в  $i$ -ой точке, где  $i = \overline{1, N}$ ,  $N$  – число точек замера температуры;  $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i = \bar{n} = \bar{n}$  – среднее (ожидаемое) значение температуры;  $\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(n_i - \frac{n}{N}\right)^2 = \hat{\sigma}^2 = S^2$  – оценка дисперсии.

При этом значения случайной величины  $S^2$  подчинены распределению  $\chi_k^2 = \frac{kS^2}{\sigma^2}$ , где  $\frac{k}{\sigma^2} = \text{const}$  и ожидаемое среднее  $\bar{n}$  в решаемой задаче  $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i = \bar{n} = \text{const}$  для всех  $i$ -ых групп,  $i = \overline{1, N}$ . Тогда коэффициент вариации

$$V = \frac{S}{\bar{n}} = \frac{N}{n\sqrt{N-1}} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(n_i - \frac{n}{N}\right)^2}. \quad (4)$$

При этих же определяемых характеристиках для  $X^2$ -статистики в условиях равномерного распределения получаем

$$X^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(n_i - \bar{n})^2}{\bar{n}} = \sum_{i=1}^N \frac{\left(n_i - \frac{n}{N}\right)^2}{\frac{n}{N}} = \frac{N}{n} \sum_{i=1}^N \left(n_i - \frac{n}{N}\right)^2, \quad (5)$$

откуда очевидна связь

$$V^2 = \frac{N^2}{n^2(N-1)} \sum_{i=1}^N \left(n_i - \frac{n}{N}\right)^2 = \frac{N}{n(N-1)} X^2$$

или

$$X^2 = \frac{n(N-1)}{N} V^2, \quad (6)$$

где  $n = \sum_{i=1}^N n_i$ . Здесь  $n_i$  – значение измеряемой величины в  $i$ -точке, отождествляемое с частотой в  $i$ -группе формулы для  $X^2$ -статистики, предложенной также К. Пирсоном в 1904 г. для проверки  $H_0$ -гипотезы соответствия эмпирического и теоретического распределений на основе  $\chi_k^2$ -статистики с  $k$  степенями свободы [22, 23].

Таким образом, коэффициент вариации  $V$ , применяемый для оценки неравномерности распределения материала в  $i$ -группах относительно постоянной (равномерной) величины  $\bar{n}$  предполагает, что случайная величина  $V^2$  имеет  $\chi_k^2$  распределение с  $k = N - 1$  степенями свободы.

В данном исследовании авторы не ставят задачу принять или отвергнуть нулевую гипотезу на заданном уровне значимости. В рассматриваемом случае нулевую гипотезу следует расценивать не как утверждение об отсутствии эффекта для ее отклонения, а насколько велик эффект отклонения от тривиального случая. Следовательно, стоит задача неоднократного определения вероятности эффекта при изменении условий эксперимента, порождающего данный эффект.

Для получаемого значения величины  $\chi_k^2$ , используя закон ее распределения, находим уровень вероятности или коэффициент окружной неравномерности распределения физических величин, употребляемых материалов и газов  $p = p(\chi^2)$ ,  $p \in (0; 1)$  [24].

Таким образом, для разных режимов загрузки шихты в колошниковое пространство получаем меру неравномерности распределения материалов и газов, а также температуры по окружности печи. При этом уместно заметить следующее.

- Для проверки  $H_0$ -гипотезы, согласно которой случайный вектор частот  $(n_1, n_2, \dots, n_N)$  характеризуется вектором положительных вероятностей, причем  $p_1 + p_2 + \dots + p_N = 1$ , статистика  $X^2$  основана на формуле

$$X^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \frac{n_i^2}{p_i} - n, \quad (7)$$

где  $n = n_1 + n_2 + \dots + n_N$ ,  $n_i \geq 5$ ,  $i = \overline{1, N}$ .

При  $n \rightarrow \infty$  и выполнении  $H_0$ -гипотезы  $X^2 \rightarrow \chi_k^2$  с  $k = N - 1$  степенями свободы. Для заданного уровня значимости  $\alpha$  гипотеза  $H_0$  отвергается при  $X^2 \geq \chi_{N-1}^2(\alpha)$ , где  $\chi_{N-1}^2(\alpha)$  – верхняя  $\alpha$ -квантиль  $\chi_k^2$ -распределения. Вероятность ошибки  $p\{\chi_{N-1}^2 \geq \chi_{N-1}^2(\alpha)\} = \alpha$ .

- Статистику  $X^2$  используют также для проверки  $H_0$ -гипотезы о принадлежности функции распределения независимых одинаково распределенных случайных величин  $X_1, X_2, \dots, X_N$  семейству непрерывных функций  $F(x, \theta)$ ,  $x \in R_1$ , зависящих от неизвестного параметра  $\theta$  [25]. Тогда, разбивая действительную прямую точками  $x_0 < x_1 < \dots < x_N$  (для общего случая  $x_0 = -\infty$ ,  $x_N = +\infty$ ) на  $N$ ,  $N > m$  интервалов  $(x_0, x_1), \dots, (x_{N-1}, x_N)$  таких, что для определенного параметра  $\theta$   $p_i(\theta) = p\{x_i \in (x_{i-1}, x_i)\} > 0$ ,

$i = \overline{1, N}$ ,  $p_1(\theta) + p_2(\theta) + \dots + p_N(\theta) = 1$  образуют по аналогии с вектором частот  $(n_1 \dots n_N)$  группировку (в тех же обозначениях) значений случайной величины. Тогда  $X^2(\theta) = \sum_{i=1}^N \frac{(n_i - np_i(\theta))^2}{np_i(\theta)}$  – случайная величина, зависящая от неизвестного параметра  $\theta$ , вычисленная по методу минимума  $X^2(\theta)$ , т. е.  $X^2(\hat{\theta}) = \min X^2(\theta)$  [23, 25], при этом нужно следить, чтобы значения  $n_i \geq 5$ .

• Применение  $X^2$ -статистики для проверки  $H_0$ -гипотезы при измерении физических величин затруднительно [23] из-за определения подходящего (преобразующего) параметра  $(\theta)$ , способствующего при выполнении  $H_0$ -гипотезы условия, что  $X^2(\theta) = \chi_k^2$ . В этом случае нужно принимать во внимание поведение квантилей распределения  $\chi_{k,p}^2$ , вероятности которых обычно табулированы [24]:

$$p = \frac{1}{2^{k/2} \Gamma(k/2)} \int_0^{\chi_{k,p}^2} x^{k/2-2} e^{-x/2} dx, \quad (8)$$

где значение  $\chi_{k,p}^2$  представляет собой сумму квадратов  $k$  независимых значений нормальной величины со средним 0 и дисперсией 1.

Очевидно, что использование  $\chi_k^2$ -статистики при  $k = N - 1$  для вычисления  $p = p(\chi_k^2)$  в условиях формирования  $X^2$ -статистики на основе измерений  $n_i$ ,  $i = \overline{1, N}$  исследуемой физической величины необходимо согласование поведения обеих статистик. Для решаемой задачи в условиях принятия  $H_0$ -гипотезы о равномерном распределении (при допустимых отклонениях от среднего значения измеряемых результатов  $n_i$  в  $i$ -точках) сложной корректировки  $X^2$ -статистики не потребуются. В данном случае корректировка легко выполняется с помощью подходящего коэффициента (квантильного множителя  $q$ ), определяемого из условия  $qX_{\max}^2 \approx \chi_k^2(\alpha)$ , где  $\chi_k^2(\alpha)$  – верхняя  $\alpha$ -квантиль,  $X_{\max}^2 \subset \{X_{(j)}^2\}$ ,  $j = \overline{1, M}$ ,  $M$  – число экспериментов, завершаемых вычислением

$X_{(j)}^2$ -статистики. При этом в корректируемой статистике  $X_{\text{кор}}^2 = qX^2$  должно быть выполнено условие Пирсона,  $n_i \geq 5 \forall i = \overline{1, N}$ .

Предложенный метод определения неравномерности распределения материалов по окружности колошника опробовали на доменных печах ОАО «ММК» объемом 2014 и 1370 м<sup>3</sup>. Коэффициент окружной неравномерности ( $p$ ) предполагалось определить по значениям измеряемых температур периферийного газа под газоотводами ( $T_i$ , °С). Изменение неравномерности оценили для режимов загрузки шихтовых материалов в доменные печи, которые отличались долей агломерата, располагающегося в нижней части бункера бесконусного загрузочного устройства (БЗУ) под добавочными материалами в процентном отношении (0; 50 и 100). Поскольку при нормальной работе печи температура периферийных газов под газоотводами в натуральных величинах колеблется в интервале от 80 до 200 °С относительно среднего значения, то эти изменения не являясь аналогом частот  $n_i$ ,  $i = \overline{1, N}$ , быстро приводили  $\chi_k^2$ -статистику к верхней  $\alpha$ -квантили  $\chi_k^2(\alpha)$  для всякого приемлемого  $\alpha = 1 - p$ . Следовательно, необходимо было преобразование получаемых измерений температуры так, чтобы приведенная температура, формирующая  $X^2$ -статистику, отражала поведение квантилей  $\chi_{k,p}^2 < \chi_k^2(\alpha)$  распределения Пирсона для  $k = N - 1$  в условиях выполнения  $H_0$ -гипотезы.

В связи с этим, первоначально проанализировав работу четырех доменных печей за период один год для различных условий плавки, выявили подходящий коэффициент, равный  $1/5 = q$ , позволяющий преобразовать натуральное значение температуры  $T_i$ , °С к аналогичной частоте, а именно  $n_i = T_i/5$ . Такое преобразование (табл. 2) дало возможность получить адекватную сходимость по вероятности  $p(X_{\text{кор}}^2) \rightarrow p(\chi_k^2)$  с учетом используемых степеней свободы  $k = N - 1$  (проверено для  $4 \leq N \leq 8$ ). Заметим, что при корректировке значений  $i$ -измерений в рассматриваемом случае величина  $X^2$  также корректируется автоматически, что удобно для расчета числовых характеристик (табл. 3).

Таблица 2

**Распределение приведенных температур периферийного газа в разных периодах и условиях загрузки доменных печей ОАО «ММК»**

Table 2. Distribution of the reduced peripheral gas temperature in different periods and loading conditions of the blast furnaces of OJSC “MMK”

Объем доменной печи, м <sup>3</sup>	Номер периода	Доля агломерата, располагающегося в бункере БЗУ под добавочными материалами ( $D_A$ ), %	Приведенные температуры периферийного газа под газоотводами по точкам замера, $n_i$							
			1	2	3	4	5	6	7	8
2014	I	0	31,7	33,6	30,7	18,0	25,2	21,2	20,7	21,8
	II	100	30,1	32,0	30,1	17,3	25,5	21,0	21,0	20,9
1370	III	100	36,1	39,0	40,1	31,0	–	–	–	–
	IV	50	31,9	36,6	35,7	29,5	–	–	–	–

Описательная статистика для оценки неравномерности распределения шихтовых материалов

Table 3. Descriptive statistics for the evaluation of uneven distribution of charge materials

Объем доменной печи, м <sup>3</sup>	Д <sub>А</sub> , %	Среднее	Число степеней свободы <i>k</i>	Оценка дисперсии	Коэффициент вариации <i>V</i>	$X^2_{кор} = \chi^2_k$ статистика	Вероятность $p = P(\chi^2_k)$
2014	0	25,4	7	34,6	0,23	10,0	0,81
	100	24,8	7	29,9	0,22	9,1	0,75
1370	100	36,5	3	16,6	0,11	1,36	0,29
	50	33,4	3	11,0	0,10	0,99	0,20

Для оценки неравномерности распределения шихтовых материалов на примере распределения смеси агломерата и окатышей с использованием меры  $p = P(\chi^2_k)$  потребовалось введение иных множителей ( $q_{агл} = 0,13$ ,  $q_{ок} = 0,06$ ) для преобразования массы взвешенных  $N = 6$  порций в лабораторном эксперименте названных компонент. Эти результаты приведены для сравнения совместно с коэффициентами вариации (табл. 4).

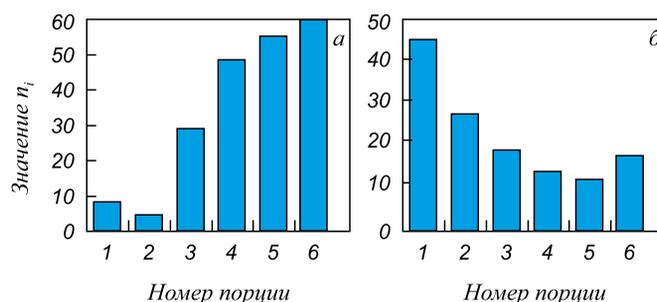
При сравнении исследуемых периодов на доменной печи объемом 2014 м<sup>3</sup> видно, что смена режима «добавки наверх скипа» на «добавки на дно скипа» сопровождалась более равномерным распределением материалов в колошниковом пространстве печи, на что указывает уменьшение коэффициента равномерности  $p$  от 0,81 до 0,75 (см. табл. 3). Это является результатом более равномерного поступления агломерата и окатышей при выгрузке порции шихты из бункера БЗУ на лоток и подтверждается данными физического моделирования (см. рисунок, табл. 4). Сравнивая результаты столбцов  $V$  и  $p$ , следует заметить, что оценки неравномерности распределения для столбцов  $p$  более различимы, чем столбцов  $V$ .

В периоде IV, по сравнению с периодом III, на доменных печах объемом 1370 м<sup>3</sup> при расположении добавочных материалов в середине слоя наблюдали улучшение равномерности распределения материалов по окружности колошника печи. Коэффициент неравно-

мерности уменьшился от 0,29 до 0,20 (см. табл. 3). Это сопровождалось улучшением технико-экономических показателей плавки (табл. 5).

**Выводы.** Получена зависимость величин  $V^2$  и  $X^2$  для условия равномерного их распределения. Это предполагает, что случайные величины  $V^2$  и  $X^2$  при соответствующей корректировке имеют  $\chi^2_k$ -распределение Пирсона с  $k = N - 1$ .

Разработана и предложена методика определения относительной неравномерности распределения физических величин и материалов на основе  $X^2$ -статистики, используя квантили  $\chi^2_k$ -статистики для вычисления



Распределение условных единиц ( $n_i$ ) окатышей по ходу выпуска шести порций при  $p = 0,960$  (а),  $p = 0,042$  (б)

Distribution of conventional units ( $n_i$ ) of pellets during the release of 6 servings at  $p = 0.960$  (a),  $p = 0.042$  (b)

Способы оценки равномерности поступления агломерата (А) и окатышей (О) в колошниковое пространство физической модели БЗУ лоткового типа [11]

Table 4. Methods for evaluating the uniformity of sinter receipt (АгЛ) and pellets (Ок) in the throat space of the physical model BLT of trough type [11]

Доля агломерата, располагающегося в бункере БЗУ под добавочными материалами, %	Содержание окатышей в железорудной части шихты, %	Коэффициент вариации $V$ для компонентов шихты			$X^2_{кор} = \chi^2_k$ ( $k = 5$ )		$p = P(\chi^2_k)$		
		А	О	среднее	А	О	А	О	среднее
0	30	0,52	1,11	0,82	11,6	11,6	0,960	0,960	0,960
50	30	0,16	0,34	0,25	1,12	1,06	0,048	0,042	0,045
100	30	0,22	0,51	0,36	2,20	2,28	0,180	0,190	0,185

Таблица 5

## Технико-экономические показатели работы доменных печей в исследуемые периоды

Table 5. Technical and economic indicators of the blast furnaces work in the analyzed period

Объем доменной печи, м <sup>3</sup>	Номер периода	Удельная производительность печи, т/м <sup>3</sup> ·сут	Удельный расход кокса, кг/т чугуна
2014	I	1,98	474,4
	II	2,01	471,6
1370	III	2,65	451,3
	IV	2,66	427,3

$p = p(\chi_k^2)$ , что позволило различать более равномерное распределение материалов шихты и газов от менее равномерного.

Установлено, что для использования  $\chi^2$ -статистики измерений физических величин (температуры, давления), а также материалов (сыпучих, газообразных) необходимо корректировать, минимизируя значения  $\chi^2$  до верхней  $\alpha$ -квантили  $\chi_k^2(\alpha)$  на заданном уровне значимости  $\alpha = 1 - p$  при  $k = N - 1$  степенях свободы.

Предлагается ввести понятие квантильного множителя  $q$  для корректировки  $\chi^2$ , с помощью которого произведение  $q\chi_{\max}^2 \approx \chi_k^2(\alpha)$ , где  $\chi_k^2(\alpha)$  – верхняя  $\alpha$ -квантиль, устанавливаемая для отклонения  $H_0$ -гипотезы на уровне значимости  $\alpha$  при условии, если  $q\chi^2 = X_{\text{кор}}^2 \geq \chi_k^2(\alpha)$ . Тогда  $q\chi^2 = X_{\text{кор}}^2 \Rightarrow p = p(\chi_{k,p}^2)$ , где  $\chi_{k,p}^2$  – внутренняя квантиль для определения показателя  $p$  (относительная неравномерность  $p < 1 - \alpha$ ).

Методика определения окружной неравномерности апробирована на доменных печах ОАО «ММК» объемом 1370 и 2014 м<sup>3</sup>. Установлено, что изменение последовательности набора компонентов шихты в бункер БЗУ влияет на коэффициент окружной неравномерности  $p$ . Уменьшение его величины в опытных периодах сопровождалось повышением технико-экономических показателей плавки.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тонких Д.А., Кариков С.А., Тараканов А.К. и др. Совершенствование режимов загрузки и дутья на доменных печах ПАО МК «АЗОВСТАЛЬ» // *Металлург*. 2013. № 9. С. 42 – 48.
2. Большаков В.И., Шулико С.Т., Лебедь В.В. и др. Распределение дутья по окружности доменной печи объемом 5000 м<sup>3</sup> при ее работе и выдувке // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2005. № 2. С. 10 – 13.
3. Сибатагуллин С.К., Харченко А.С., Бегинюк В.А. Технологические решения для оптимальной реализации доменного процесса // *Металлург*. 2014. № 4. С. 64 – 70.
4. Андронов В.Н., Белов Ю.А. Оценка эффективности распределения дутья и природного газа по фурмам // *Сталь*. 2002. № 9. С. 15 – 17.
5. Листопадов В.С., Дмитриенко К.А., Параносенков А.А. и др. Исследование влияния распределения потока на ровность схода

- материалов по окружности доменной печи // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2008. № 6. С. 11 – 15.
6. Сибатагуллин С.К., Харченко А.С., Полинов А.А. и др. Стабилизация соотношения расходов природного газа и дутья по фурмам доменной печи // *Теория и технология металлургического производства*. 2014. № 1 (14). С. 23 – 25.
7. Большаков В.И. Научное обоснование стратегии управления распределением шихты при использовании БЗУ // *Сталь*. 2002. № 4. С. 37 – 42.
8. Сторожик Д.А., Гребенюк В.М., Тылкин М.А. Изготовление и эксплуатация загрузочных устройств доменных печей. – М.: *Металлургия*, 1973. – 319 с.
9. Большаков В.В., Рослик Н.А., Шутылев Ф.М., Котов А.П. Оценка окружного распределения шихты на доменной печи с лотковым БЗУ // *Сталь*. 1993. № 2. С. 11 – 14.
10. Большаков В.В., Рослик Н.А., Шутылев Ф.М. и др. Управление газораспределением в доменной печи, оборудованной бесконусным загрузочным устройством // *Сталь*. 1995. № 7. С. 15 – 19.
11. Сибатагуллин С.К., Харченко А.С. Выявление рациональной последовательности набора компонентов сырья в бункер БЗУ лоткового типа физическим моделированием // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2015. № 3. С. 28 – 34.
12. Большаков В.И., Лебедь В.В., Жеребецкий А.А. Совершенствование управления окружным распределением шихты на доменной печи, оснащенной БЗУ // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Днепропетровск: ИЧМ НАН Украины*, 2010. Вып. 22. С. 18 – 26.
13. Большаков В.И., Муравьева И.Г., Семенов Ю.С., Шулико С.Т. Оценка окружного распределения шихты в доменной печи радиолокационным профиломером // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Днепропетровск: ИЧМ НАН Украины*, 2008. Вып. 17. С. 74 – 85.
14. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. – М.: *Машиностроение*, 1973. – 216 с.
15. Sibatullin S.K., Kharchenko A.S., Logachev G.N. The rational mode of nut coke charging into the blast furnace by compact trough-type charging device // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 86. P. 531 – 537.
16. Воронин В.В., Адигамов К.А., Петренко С.С., Сизякин Р.А. Критерии и способы оценки качества смешивания сыпучих материалов // *Инженерный вестник Дона*. 2012. Т. 23. № 4 – 2 (23). С. 36.
17. Seber G. A. *Multivariate Observations*. – New York: Wiley, 1984. – 686 p.
18. Spath H. *Cluster Dissection and Analysis: Theory, FORTRAN Programs, Examples*. Translated by J. Goldschmidt. – New York: Halsted Press, 1985.
19. Gorban A.N., Zinovyev A.Y. *Principal Graphs and Manifolds. Part. 2 // Handbook of Research on Machine Learning Applications and Trends: Algorithms, Methods, and Techniques*. Emilio Soria Olivas et al. (eds), IGI Global, Hershey, PA, USA, 2009. P. 28 – 59.
20. А.с. 1651172 РФ. Твердохлебова С.В., Спиридонова И.М. // Способ определения равномерности распределения легирующих элементов в сплавах; заявл. 23.05.1989; опубл. 23.05.1991. Бюл. № 19.
21. Математика: Энциклопедия / Под ред. Ю.В. Прохорова. – М.: Большая Российская энциклопедия. 2003. – 845 с.
22. Девятченко Л.Д. Таблицы сопряженности. Введение в анализ соответствий. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2008. – 127 с.
23. Кендалл М., Стьюарт А. *Статистические выводы и связи*. – М.: Наука, 1976. – 736 с.
24. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. *Таблицы математической статистики*. – М.: Наука, 1983. – 416 с.
25. *Математическая энциклопедия / Под ред. И.М. Виноградова*. Т. 5. – М.: Советская энциклопедия, 1985. – 623 с.

Поступила 3 апреля 2017 г.

## EVALUATION OF UNEVEN DISTRIBUTION OF CHARGE MATERIALS AT BLAST FURNACE

S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, L.D. Devyatchenko

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

**Abstract.** In various industries, the uneven distribution of material and energy resources significantly affects stability of the technological process and reduces the quality of products. In particular, in the blast-furnace production, the uneven distribution of charge materials and the temperature of gases significantly affect technical and economic performance of the furnace. The analysis of bibliographic sources has shown that for the estimation of unevenness various coefficients were generally used, taking into account the variability of material and energy resources in the production process, the coefficient of variation introduced by K. Pierson in 1895 was the most widespread. It was determined the relation between the square of the coefficient of variation of  $V^2$  and the value  $X^2 = \frac{n(N-1)}{N} V^2$ , according to which the random variable  $V^2$  has  $\chi_k^2$  a distribution with  $k$  degrees of freedom,  $k = N - 1$ , where  $n = n_1 + n_2 + \dots + n_N$ ,  $n_i$  is the value of the  $i$ -th measurement,  $i = 1, N$ ,  $N$  – is the number of measurements. The proposed method for estimating the unevenness is based on statistics  $\chi_k^2$  and  $X^2$ , also introduced by K. Pearson in 1901 and 1904, respectively. The latter was intended to test the  $H_0$ -correspondence of the empirical and statistical distribution. The method for determining the circumferential irregularity in the distribution of materials and gases in a blast furnace is based on the consistency of  $\chi_k^2$  and  $X^2$  of Pearson statistics, using the so-called quantile factor  $q$ , if in calculations of  $X^2$  the values of the physical quantities themselves are used, by analogy, not the frequency of the measured quantities. In this method,  $X^2$ -statistic after correction was used to determine the measure of deviation ( $p$ ) from the uniform distribution, i.e. the unevenness coefficient  $p = p(\chi_k^2)$ ,  $p \in (0; 1 - \alpha)$ ,  $\chi_k^2 = X_{\text{сop}}^2 = qX^2$  was calculated. In order to reconcile  $X^2$  and  $\chi_k^2$  statistics with the measurements of the physical quantities (temperature, pressure) or materials (granular, gaseous), the  $X^2$ -statistic must be adjusted so that  $qX_{\text{max}}^2 \approx \chi_k^2(\alpha)$ ,  $X_{\text{max}}^2 \in (X_1^2, \dots, X_M^2)$ , where  $M$  – is the number of experiments for which the values of  $X^2$ -statics were determined,  $\chi_k^2(\alpha)$  – the upper  $\alpha$ -quantile of  $\chi_k^2$  statistic,  $q$  – the quantile multiplier, introduced for the correction of the  $X^2$ -statistic values,  $X_{\text{max}}^2$  – the maximum value of  $X^2$ -statistic is admissible for determining the measure of non-uniformity. The method was tested to evaluate the relative non-uniformity of the loaded charge components and the distribution of peripheral temperature at blast furnaces of OJSC “MMK” with volume of 2014 and 1370 m<sup>3</sup>. The influence of the sequence of a set of charge components in the hopper of a bell-less charging device of the furnace on the coefficient of circumferential unevenness ( $p$ ) and the technical and economic parameters of melting was revealed.

**Keywords:** blast furnace, determining method, uneven distribution of charge materials and gases, gas temperature in a circumference.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-766-773

### REFERENCES

1. Tonkikh D.A., Karikov S.A., Tarakanov A.K., Koval'chik R.V., Kostomarov A.S. Improving the charging and blast regimes on blast furnaces at the Azovstal metallurgical combine. *Metallurgist*. 2014, vol. 57, no. 9–10, pp. 797–803.
2. Bol'shakov V.I., Shuliko S.T., Lebed' V.V., Semenov Yu.S., Dmitrenko K.A., Popov V.N. Distributing of blowing on a circumference in a high furnace by volume of 5000 during its work. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2005, no. 2, pp. 10–12. (In Russ.).
3. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Beginyuk V.A. Processing solutions for optimum implementation of blast furnace operation. *Metallurgist*. 2014, vol. 58, no. 3–4, pp. 285–293.
4. Andronov V.N., Belov Yu.A. Evaluation of efficiency of blast and gas distribution among tuyeres. *Stal'*. 2002, no. 9, pp. 15–17. (In Russ.).
5. Listopadov V.S., Dmitrienko K.A., Paranosenkov A.A. etc. Investigation of the influence of flow distribution on the evenness of material descent along the circumference of blast furnace. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2008, no. 6, pp. 11–15. (In Russ.).
6. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S. Polinov A.A. etc. Stabilization of the ratio of natural gas and blast flows through blast furnace tuyeres. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2014, no. 1 (14), pp. 23–25. (In Russ.).
7. Bol'shakov V.I. Scientific grounding of strategy for controlling the burden distribution. *Stal'*. 2002, no. 4, pp. 37–42. (In Russ.).
8. Storozhik D.A., Grebenyuk V.M., Tylkin M.A. *Izgotovlenie i ekspluatatsiya zagruzochnykh ustroystv domennykh pechei* [Manufacture and operation of charging devices of blast furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 319 p. (In Russ.).
9. Bol'shakov V.B., Roslik N.A., Shutylev F.M., Kotov A.P. Assessment of circumferential burden distribution at blast furnace with trough bellless top. *Stal'*. 1993, no. 2, pp. 11–14. (In Russ.).
10. Bol'shakov V.B., Roslik N.A., Shutylev F.M. Gas distribution control in blast furnace equipped with bellless charging device. *Stal'*. 1995, no. 7, pp. 15–19. (In Russ.).
11. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.C. Identification of an efficient sequence of charging components of raw materials into hopper of the bell-less charging device of chute type by physical modeling. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2015, no. 3, pp. 28–34. (In Russ.).
12. Bol'shakov V.I., Lebed' V.V., Zhrebetskii A.A. Improvement of management of the distribution of charge on the blast furnace equipped with a bell-less charging device. In: *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metallurgii: Sb. nauchn. tr.* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy: Coll. of Sci. Papers]. Issue 22. Dnepropetrovsk: IChM NAN Ukrainy, 2010, pp. 18–26. (In Russ.).
13. Bol'shakov V.I., Murav'eva I.G., Semenov Yu.S., Shuliko S.T. Estimation of the circumferential distribution of charge in a blast furnace by a radar profiler. In: *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metallurgii: Sb. nauchn. tr.* [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy: Coll. of Sci. Papers]. Issue 17. Dnepropetrovsk: IChM NAN Ukrainy, 2008, pp. 74–85. (In Russ.).
14. Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov. Monografiya*. [Apparatus for mixing of loose materials: Monograph]. Moscow: Mashinostroenie, 1973, 216 p. (In Russ.).
15. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Logachev G.N. The rational mode of nut coke charging into the blast furnace by compact trough-type charging device. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016, vol. 86, pp. 531–537.
16. Voronin V.V., Adigamov K.A., Petrenko S.S., Sizyakin R.A. Criteria and methods for assessing the quality of loose materials mixing. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2012, vol. 23, no. 4–2 (23), pp. 36. (In Russ.).
17. Seber G.A. *Multivariate Observations*. New York: Wiley, 1984, 686 p.
18. Spath H. *Cluster Dissection and Analysis: Theory, FORTRAN Programs, Examples*. Translated by J. Goldschmidt. New York: Halsted Press, 1985.
19. Gorban A.N., Zinovyev A.Y. Principal Graphs and Manifolds. Part. 2. In: *Handbook of Research on Machine Learning Applications and Trends: Algorithms, Methods, and Techniques*. Emilio Soria Olivares et al. (eds), IGI Global, Hershey, PA, USA, 2009, pp. 28–59.

20. Tverdokhlebova S.V., Spiridonova I.M. *Sposob opredeleniya ravnornosti raspredeleniya legiruyushchikh elementov v splavakh* [Method for determining the uniformity of distribution of alloying elements in alloys]. Certificate of authorship no. 1651172 RF. *Byulleten' izobretenii*. 1989, no. 19. (In Russ.).
21. *Matematika: Entsiklopediya* [Mathematics: Encyclopedia]. Prokhorov Yu.V. ed. Moscow: Bol'shaya Rossiiskaya entsiklopediya, 2003, 845 p. (In Russ.).
22. Devyatchenko L.D. *Tablitsy sopryazhennosti. Vvedenie v analiz sootvetstviy* [Contingency tables. Introduction to the analysis of correspondences]. Magnitogorsk: MGTU im. G.I. Nosova, 2008, 127 p. (In Russ.).
23. Kendall Maurice G., Stuart A. *The advanced theory of statistics*. 2nd edition. Hafner, 1963. (Russ.ed.: Kendall M., Stuart A. *Statisticheskie vyvody i svyazi*. Moscow: Nauka, 1976, 736 p.).
24. Bol'shev L.N., Smirnov N.V. *Tablitsy matematicheskoi statistiki* [Tables of mathematical statistic]. Moscow: Nauka, 1983, 416 p. (In Russ.).
25. *Matematicheskaya entsiklopediya*. Vol. 5 [Mathematical encyclopedia]. Vinogradov I.M. ed. Moscow: Sovetskaya Entsiklopediya, 1248 p. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The results were obtained within the framework of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. 11.8979.2017/БЧ.

**Information about the authors:**

**S.K. Sibagatullin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metallurgy Technology and Casting Processes" (10skt@mail.ru)

**A.S. Kharchenko**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metallurgy Technology and Casting Processes" (as.mgtu@mail.ru)

**L.D. Devyatchenko**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Mathematics (devyatleo@mail.ru)

Received April 3, 2017

УДК 669.14

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ ТРУБНОЙ СТАЛИ 17Г1С–У, МИКРОЛЕГИРОВАННОЙ БОРОМ\*

*Бабенко А.А., д.т.н., ведущий научный сотрудник (babenko@gmail.com)*

*Жучков В.И., д.т.н., главный научный сотрудник (ntm2000@mail.ru)*

*Сельменских Н.И., научный сотрудник*

*Уполовникова А.Г., к.т.н., старший научный сотрудник (upol.ru@mail.ru)*

**Институт металлургии УрО РАН**

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

**Аннотация.** Приведены результаты анализа влияния микролегирования бором на структуру и свойства трубной стали марки 17Г1С-У. Исследования структуры металла выполнены методами электронной микроскопии и локального рентгеноспектрального анализа. Установлено, что металл, содержащий 0,006 % бора, характеризуется повышенной (до 0,029 %) объемной концентрацией оксидных и окисьюльфидных включений, содержание которых в металле без бора достигает 0,006 %. При этом в металле с бором, содержащем 0,003 % серы, практически отсутствуют отдельные сульфидные включения, концентрация которых не превышает 0,004 % против 0,029 % в металле без бора, содержащем 0,01 % серы. Микролегирование трубной стали бором обеспечило преимущественное формирование мелких неметаллических включений, равномерно распределенных в объеме металла. Доля неметаллических включений размером не более 2 мкм составляет 76,1 %, тогда как в стали без бора только 58,5 %. При этом крупные неметаллические включения размером более 10 мкм в образце с бором практически отсутствуют; их доля не превышает 0,6 %, что в 22 раза меньше их количества в образце без бора. Структура образца без бора состоит преимущественно из феррита и небольшого количества перлита, а образец с бором представлен дисперсной феррито-бейнитной структурой. При добавлении бора в сталь наблюдается повышение микротвердости как феррита, так и перлита на 80 и 100 HV10 соответственно. Горячекатаный металлопрокат из боросодержащей трубной стали 17Г1С-У толщиной 10 мм благодаря формированию преимущественно мелких неметаллических включений и мелкодисперсной феррито-бейнитной структуры характеризуется повышенными прочностными свойствами с сохранением пластических характеристик. Абсолютные значения предела текучести и временного сопротивления металлопроката трубной стали, содержащей 0,006 % В и 0,003 % S, достигают без термообработки 585 и 685 МПа соответственно и отвечают классу прочности X80; сохраняются достаточно высокие пластические характеристики. Металлопрокат трубной стали без бора, содержащей 0,01 % S, относится к классу прочности X70 и характеризуется пониженными до 540 и 610 МПа пределом прочности и временным сопротивлением соответственно.

**Ключевые слова:** трубная сталь, бор, сера, марганец, неметаллические включения, структура, механические свойства.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-10-774-779

### ВВЕДЕНИЕ

Сталь была и остается основным конструкционным материалом, объемы производства и потребления которого значительно превышают альтернативные материалы. Требования к уровню и стабильности технологических, служебных и качественных характеристик металлопродукции постоянно растут, за последние 5 – 10 лет они увеличились в несколько раз [1 – 3]. При этом важной особенностью является необходимость одновременного достижения предельно высокого уровня целого комплекса свойств, часто трудно сочетаемых, таких как прочность и пластичность, штампуемость и коррозионная стойкость.

Сегодня наряду с глубокой десульфурацией стали [3 – 7] перспективным направлением достижения высокого уровня перечисленных выше свойств является микролегирование стали [8 – 16]. Например, микролегирование стали бором, введение которого в металл

в количестве 0,001 – 0,005 % (по массе) позволяет достигнуть одновременно повышения прочности без снижения пластичности при экономии дефицитных дорогостоящих легирующих элементов, таких как молибден, марганец, хром, никель и др. [10 – 13]. В процессе работы установлена высокая эффективность воздействия оптимальных микродобавок бора на структурообразование сталей. Показано, что образование твердого раствора бора в сталях позволяет формировать бейнитную структуру даже при низких скоростях охлаждения штрипса после прокатки [14], при этом повышаются прочностные свойства стали, которые могут соответствовать свойствам стали класса прочности X90 и даже X100. В работе [15] за счет дополнительного микролегирования стали бором удалось создать трубную сталь класса прочности X120. Кроме того, установлено положительное влияние микродобавок бора на измельчение зерна низкоуглеродистой стали типа Mn–Mo–Nb–Ti–B, обладающей высокой ударной вязкостью [16], структура такой стали преимущественно состоит из нижнего бейнита.

\* Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10435).

## Химический состав опытной и сравнительной плавок трубной стали 17Г1С-У

Table 1. Chemical composition of experimental and comparative melting of 17G1S-U pipe steel

Варианты выплавки стали	Содержание элементов, % (по массе)												
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Nb	Ti	N	Al	B
без бора	0,06	1,4	0,23	0,010	0,014	0,02	0,04	0,04	0,06	0,02	0,005	0,05	0
с бором	0,06	1,4	0,17	0,003	0,014	0,02	0,04	0,07	0,06	0,02	0,006	0,03	0,006

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты по выплавке борсодержащей трубной стали марки 17Г1С-У проводили в соответствии с технологическими инструкциями по выплавке стали в кислородных конвертерах из фосфористых чугунов [17] и внепечной обработки стали для слабовых МНЛЗ [18] с соблюдением рекомендованных расходов шлакообразующих материалов и раскислителей [19, 20]. В табл. 1 приведен химический состав плавок трубной стали, используемой для исследования структуры и свойств металлопроката.

Исследования структуры образцов трубной стали 17Г1С-У проводили методами электронной микроскопии и локального рентгеноспектрального анализа с помощью оптического (Olympus) и растрового электронного (JSM-59000LV) микроскопов, а рентгеноспектральный микроанализ – на энергодисперсионном рентгеновском спектрометре INCA Energy 200. Величину зерна определяли в соответствии с ГОСТ 5639 – 82 (п. 3.5.4).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В полученных образцах трубной стали выделены три основные группы неметаллических включений: оксисульфидные включения (ОСВ), оксидные включения (ОВ) и сульфидные включения (СВ). Самостоятельные борсодержащие включения в образцах трубной стали не выявлены. Не обнаружен бор и в выделенных неметаллических включениях. Металл, содержащий 0,006 % бора, характеризуется повышенной до 0,029 % объемной концентрацией ОВ и ОСВ, концентрация которых в металле, не содержащем бор, достигает 0,006 %. При этом в металле с бором, содержащем 0,003 % серы, практически отсутствуют отдельные СВ, содержание которых не превышает 0,004 % против 0,029 % в металле без бора, содержащем 0,02 % серы (табл. 2).

Микролегирование трубной стали бором обеспечило преимущественное формирование мелких неметаллических включений, равномерно распределенных в объеме металла. Доля неметаллических включений размером не более 2 мкм составляет 76,1 %, тогда как в стали без бора только 58,5 %. При этом крупные

неметаллические включения размером более 10 мкм в образце с бором практически отсутствуют. Их доля не превышает 0,6 %; это в 22 раза меньше их количества в образце без бора.

Мелкие включения размером не более 2 мкм, присутствующие в трубной стали с бором, являются силикатными стеклами с оксидами железа и марганца и округлыми оксисульфидами. Отдельные СВ не были выявлены. В образце с бором характерные ОСВ (1) состоят из алюмомагниевого шпинели ( $Al_2O_3 \cdot MgO$ ) с небольшим содержанием сульфидов кальция и марганца и ОВ (2) и (3), содержат  $SiO_2$ , FeO и MnO (рис. 1). При этом, как отмечают авторы работы [21], наличие мелких, равномерно распределенных в металле силикатных и оксисульфидных включений улучшает прочностные свойства стали.

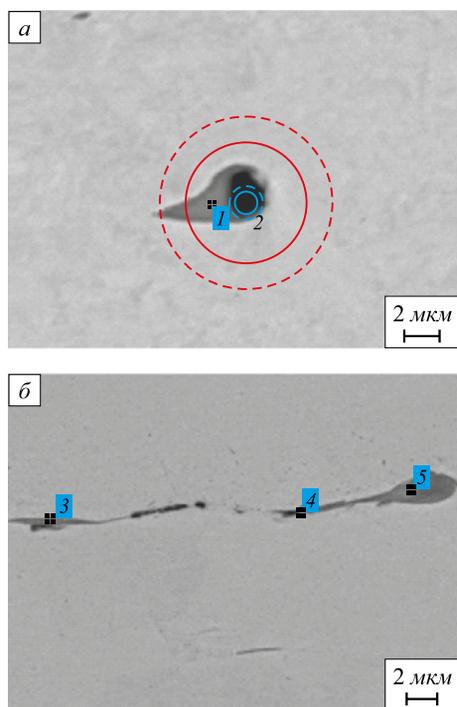
Образец стали без бора, содержащей 0,01 % S, содержит ОСВ, ОВ и отдельные СВ (рис. 2). Оксидная часть ОСВ представлена в виде округленного недеформированного (2) или слегка деформированного (5) включения, что соответствует алюмомагниевого шпинели. Сульфидные включения (1) состоят в основном

## Неметаллические включения в металлопрокате трубной стали 17Г1С-У\*

Table 2. Nonmetallic inclusions in rolled metal of 17G1S-U pipe steel

Показатель	Варианты выплавки стали	
	с бором	без бора
Содержание, % (по массе)		
B	0,006	0
Mn	1,400	1,4
Объемная концентрация, %		
ОСВ и ОВ	0,0294	0,0062
СВ	0,0038	0,0290
Доля НВ, %, размером		
0 – 2 мкм	76,1	58,5
2 – 5 мкм	22,6	22,1
5 – 10 мкм	0,7	5,8
более 10 мкм	0,6	13,6

\* В работе принимали участие В.П. Ермакова и В.Г. Смирнова.



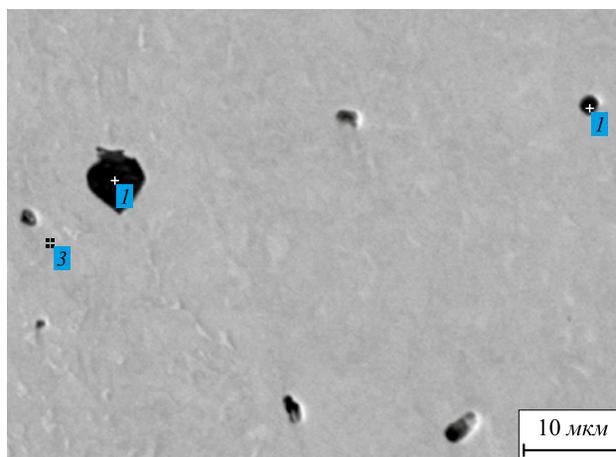
Спектр	Содержание элементов, % (по массе)							
	O	Mg	Al	S	Ca	Ti	Mn	Fe
1	—	1,51	2,02	33,98	2,12	—	47,87	12,50
2	44,36	8,27	36,77	4,19	—	0,45	3,83	2,14
3	—	—	—	4,10	—	—	7,13	88,77
4	—	—	—	1,63	—	—	4,21	94,16
5	12,29	1,06	20,72	21,98	—	1,12	39,72	3,11

Рис. 1. Комплексные оксисульфидные включения с исходной оксидной составляющей на основе алюмомагниевого шпиннели (2) и (5) и сульфидной составляющей больших (1) и малых (3, 4) размеров и их химический состав

Fig. 1. Complex oxysulfide inclusions with the initial oxide component based on aluminum magnesium spinel (2) and (5) and the sulphide component of large (1) and small (3, 4) dimensions and their chemical composition

из сульфидов марганца с небольшой долей сульфидов кальция, имеют вытянутый в направлении прокатки вид. Основная часть ОСВ имеет размер 3 – 8 мкм. Отдельные СВ (3, 4) являются сульфидом марганца и представлены в виде пленок толщиной 1,5 мкм и длиной от 4 до 100 мкм, вытянутых в направлении прокатки.

Структура образца стали, не содержащей бора, состоит преимущественно из феррита и небольшого количества перлита (рис. 3, а), а образец стали, содержащий бор, состоит из дисперсной феррито-бейнитной структуры, которая представлена мелкозернистым ферритом с участками бейнита (рис. 3, б). Отмечено уменьшение в трубной стали, микролегированной бором, размера ферритного зерна с 8,7 до 6,2 мкм и повышение микротвердости как феррита, так и перлита на 80 и 100 HV<sub>10</sub> (табл. 3). Это обусловлено, по-видимому, тем, что бор является достаточно активным элементом и поэтому сегрегирует первым на межфазных



Спектр	Содержание элементов, % (по массе)							
	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Mn	Fe
1	48,88	16,68	42,45	—	1,18	0,97	0,48	2,61
2	8,69	—	—	5,17	—	—	1,69	92,15
3	3,71	—	—	1,69	—	—	1,51	95,04

Рис. 2. Комплексные оксисульфидные включения (1) с оксидной составляющей на основе алюмомагниевого шпиннели с небольшим содержанием серы и отдельными оксидными включениями (2) и (3) и их химический состав

Fig. 2. Complex oxysulfide inclusions (1) with an oxide component based on aluminum magnesium spinel with a small sulfur content and individual oxide inclusions (2) and (3) and their chemical composition

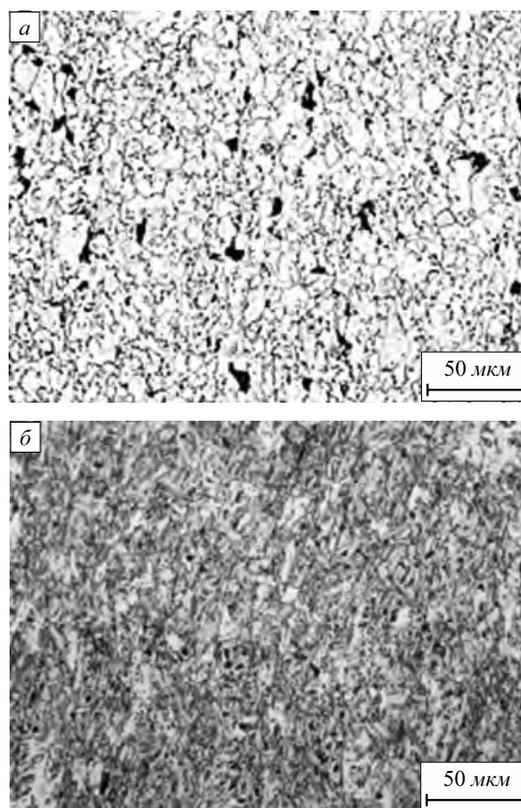


Рис. 3. Микроструктура образцов трубной стали без бора (а) и с содержанием 0,006 % бора (б)

Fig. 3. Microstructure of the samples of pipe steel without boron (a) and containing 0.006 % boron (b)

Т а б л и ц а 3

**Размер зерна феррита и микротвердость  
структурных фаз опытного и сравнительного металла  
(средние значения)**

*Table 3. Ferrite grain size and microhardness of structural phases of the experimental and comparative metal*

Варианты выплавки стали	Микротвердость, HV <sub>10</sub>		Размер зерна феррита, мкм
	перлит (бейнит)	феррит	
Без бора	214	180	8,7
С бором	314	260	7,2

границах, что способствует увеличению концентрации и равномерности распределения углерода в объеме зерен и приводит к повышению дисперсности и твердости исследуемых структур опытного металла.

Механические свойства металлопроката толщиной 10 мм из борсодержащей трубной стали 17Г1СУ благодаря преимущественному формированию мелких включений размером не более 2 мкм, представленных ОВ (силикатные стекла) и комплексными ОСВ с исходной оксидной составляющей на основе алюмомагниевого шпинели с небольшим содержанием СВ на поверхности шпинели, отсутствию обособленных СВ и формированию мелкодисперсной феррито-бейнитной структуры, характеризуются повышенными значениями прочностных свойств с сохранением пластических характеристик (табл. 4). Абсолютные значения предела текучести и временного сопротивления опытного металлопроката трубной стали, содержащей 0,006 % В и 0,003 % S, достигают без термообработки 585 и 685 МПа соответственно и отвечают классу прочности X80 без термической обработки. При таких прочностных свойствах металлопроката сохраняются достаточно высокие пластические характеристики. Металлопрокат сравнительной плавки труб-

ной стали без бора, содержащей 0,01 % S, относится к классу прочности X70 и характеризуется пониженным до 540 и 610 МПа пределом прочности и временным сопротивлением соответственно.

### Выводы

Микролегирование трубной стали 17Г1С-У бором благодаря преимущественному формированию мелких включений размером не более 2 мкм, представленных ОВ (силикатные стекла) и комплексными ОСВ с исходной оксидной составляющей на основе алюмомагниевого шпинели с небольшим содержанием СВ на поверхности шпинели, отсутствию обособленных СВ и формированию мелкодисперсной феррито-бейнитной структуры, обеспечивает без термической обработки высокие прочностные свойства металлопроката, отвечающие классу прочности X80 с сохранением высоких пластических характеристик.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Углов В.А., Зайцев А.Н. Основные направления развития металлургической технологии для обеспечения современных требований по уровню и стабильности и служебных свойств стали // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2012. № 3. С. 85 – 93.
2. Шахпазов Е.Х., Зайцев А.И., Родионова И.Г. Современные проблемы металлургии и материаловедения стали // Металлург. 2009. № 4. С. 25 – 31.
3. Арабей А.Б. Развитие технических требований к металлу труб магистральных газопроводов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 7. С. 3 – 10.
4. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. Т. 3. Вспечная металлургия стали. – М.: Теплотехник, 2010. – 544 с.
5. Чумаков С.М., Ламухин А.М., Зинченко С.Д. и др. Концепция производства низкосернистых сталей на ОАО «Северсталь» с учетом технологических аспектов. – В кн.: Труды VI конгресса сталеплавателей. – М.: АО «Черметинформация», 2001. С. 63 – 66.
6. Соколов Г.А. Вспечное рафинирование стали. – М.: Металлургия, 1977. – 208 с.

Т а б л и ц а 4

**Механические свойства исследованных образцов металлопроката трубной стали 17Г1С-У**

*Table 4. Mechanical properties of the studied samples of rolled metal of 17G1S-U pipe steel*

Показатель	Вариант выплавки стали		Стандарты		
	с бором	без бора	K60**	X70*	X80*
Содержание, %					
В	0,006	0			
Mn	1,40	1,40			
Предел текучести, МПа	585	540	412	485 – 635	555 – 705
Временное сопротивление, МПа	685	610	588 – 735	570 – 760	625 – 825
Относительное удлинение, %	19,7	25,0	16	–	–

Примечание. Одной и двумя звездочками обозначены стандарт (США) API Spec 5L и ГОСТ 20295 – 85 (Россия).

7. Nurhudin, Maulud Hidagat, Windu Basuki. Deep desulfurization process for producing ultra low sulfur steel at PT Krakatau Steel // SEA&S& Quarterly. 2004. Vol. 33. No. 2. P. 29 – 34.
8. Голубцов В.А., Лунев В.В. Модифицирование стали для отливок и слитков. – Челябинск – Запорожье: ЗНТУ, 2009. – 356 с.
9. Пилюшенко В.Л., Вихлещук В.А. Научные и технологические основы микролегирования стали. – М.: Металлургия, 2000. – 384 с.
10. Лякишев Н.П., Плинер Ю.Л., Лаппо С.И. Борсодержащие стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1986. – 191 с.
11. Софрыгина О.А., Жукова С.Ю., Битюков С.М., Пышминцев И.Ю. Разработка экономно-легированных сталей для изготовления высокопрочных труб нефтяного сортамента по API Spec5CT // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 7. С. 43 – 49.
12. Бабенко А.А., Жучков В.И., Смирнов Л.А., Сычев А.В., Акбердин А.А., Ким А.С., Витушенко М.Ф., Добромилов А.А. Исследование и разработка комплексной технологии производства низкоуглеродистой борсодержащей стали с низким содержанием серы // Сталь. 2015. № 11. С. 48 – 50.
13. Мачикин В.И., Маняк Н.А., Маняк Л.К., Мелак А.Г., Акулов В.В., Волкова В.В. Бор и неметаллические включения в низколегированной стали // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1986. № 3. С. 15, 16.
14. Heckmann C.J., Ormston D., Grimpe F., Hillenbrand H.-G., Jansen J.-P. / Development of low carbon Nb–Ti–B microalloyed steels for high strength large diameter linepipe // Ironmaking and Steelmaking. 2005. Vol. 32. No. 4. P. 337 – 341.
15. Patent 6228183 US. Ultra-high strength, weldable, boron-containing steels with superior toughness / Bangaru Narasimha-Rao V., Koo Jayoung, Luton Michael J., et al. Publ. 08.05.01.
16. Асахи Х., Хаара Т., Тзуру Е. и др. Разработка ультравысокопрочных труб Х120 УЕО. – В кн.: Международный семинар «Современные стали для газонефтепроводных труб, проблемы и перспективы»: сб. докладов. – М.: Металлургиздат, 2006. С. 123 – 130.
17. Технологическая инструкция ТИ СК-01–2007 «Выплавка стали в кислородных конвертерах». – Темиртау: АО «АрселорМиттал Темиртау», 2007.
18. Технологическая инструкция ТИ СК-07–2007 «Внепечная обработка стали для слябовых МНЛЗ». – Темиртау: АО «АрселорМиттал Темиртау», 2007.
19. Пат. 2562849 РФ. Шлаковая смесь для обработки стали в ковше / А.А. Бабенко, В.И. Жучков, Е.Н. Селиванов, А.В. Сычев, А.Н. Золин, А.А. Добромилов, Х.Ш. Кутдусова, А.И. Саврасов, А.С. Ким, А.А. Акбердин. Заявл. 11.06.2004; опубли. 10.09.2015. Бюл. № 25.
20. Пат. 30964 Республика Казахстан. Шлаковая смесь для обработки стали в ковше / А.А. Бабенко, В.И. Жучков, Е.Н. Селиванов, А.В. Сычев. 2016.
21. Комплексные неметаллические включения и свойства стали / А.И. Зайцев, В.С. Крапошин, И.Г. Родионова и др. – М.: Металлургиздат, 2015. – 276 с.

Поступила 15 мая 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 10, PP. 774–779.

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF 17G1S–U LOW–CARBON PIPE STEEL MICROALLOYED BY BORON

*A.A. Babenko, V.I. Zhuchkov, N.I. Sel'menskikh, A.G. Upolovnikova*

*Institute of Metallurgy, UB RAS, Ekaterinburg, Russia*

**Abstract.** The results of analysis of the influence of boron microalloying on structure and properties of 17G1S-U pipe steel are given in the paper. Studies of metal structure were performed by electron microscopy and local X-ray spectral analysis. It has been established that metal containing 0.006 % of boron is characterized by an increased volume concentration to 0.029 % of oxide (OS) and oxysulfide (OSB) inclusions, whose content in metal without boron reaches 0.006 %. Separate sulphide inclusions (CB), whose concentration does not exceed 0.004 % against 0.029 % in a metal without boron, containing 0.01 % S is practically absent in the metal with boron containing 0.003 % S. The microalloying of pipe steel by boron has ensured the preferential formation of small nonmetallic inclusions, evenly distributed in the volume of metal. The proportion of nonmetallic inclusions with size less than 2 μm is 76.1 %, whereas in steel without boron it is only 58.5 %. In this case, large nonmetallic inclusions of more than 10 μm are practically absent in the sample with boron. Their share does not exceed 0.6 %, which is 22 times less than their amount in the sample without boron. The structure of the sample without boron consists mainly of ferrite and a small amount of pearlite, and the sample with boron is represented by a dispersed ferritic-bainitic structure. Increasing the microhardness of both ferrite and pearlite 80 and 100 HV10, respectively, is observed by adding boron to steel. The mechanical properties of 10 mm hot rolled metal from boron-containing 17G1S-U pipe steel are characterized by increased strength properties with preservation of plastic characteristics, due to the formation of predominantly small nonmetallic inclusions and a finely dispersed ferritic-bainitic structure. The absolute values of the yield stress and the time resistance of pipe steel containing in

mass %: 0.006 B and 0.003 S are achieved without heat treatment at 585 and 685 MPa, respectively, and meet the X80 strength class, while retaining sufficiently high plastic characteristics. The pipe steel without boron containing 0.01 % of S belongs to the X70 strength class and is characterized by tensile strength lowered to 540 and 610 MPa and a temporary resistance, respectively.

**Keywords:** pipe steel, boron, sulfur, manganese, non-metallic inclusions, structure, mechanical properties.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-10-774-779

### REFERENCES

1. Uglov V.A., Zaitsev A.N. Main directions of development of metallurgical technology to ensure modern requirements for the level and stability of service characteristics of steel. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2012, no. 3, pp. 85–93. (In Russ.).
2. Shakhpazov E.Kh., Zaitsev A.I., Rodionova I.G. Current problems in the steel metallurgy and materiology. *Metallurgist*. 2009, vol. 53, no. 3–4, pp. 187–195.
3. Arabei A.B. Development of technical specifications for pipe-line steels. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 7, pp. 3–10. (In Russ.).
4. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V. *Proizvodstvo stali. T. 3. Vnepechnaya metallurgiya stali* [Steel production. 3. Out-of-furnace steel metallurgy]. Moscow: Teplotekhnika, 2010, 544 p. (In Russ.).
5. Chumakov S.M., Lamukhin A.M., Zinchenko S.D. etc. The concept of production of low-sulfur steels at Severstal OJSC, taking into account its technological aspects. In: *Trudy VI kongressa staleplavil'shchikov* [Proc. of the 6th Congress of Steel Makers]. Moscow: AO "Chermetinformatsiya", 2001, pp. 63–66. (In Russ.).
6. Sokolov G.A. *Vnepechnoe rafinирование stali* [Out-of-furnace steel refining]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 208 p. (In Russ.).

7. Nurhudin, Maulud Hidagat, Windu Basuki. Deep desulfurization process for producing ultra low sulfur steel at PT Krakatau Steel. *SEA&S& Quarterly*. 2004, vol. 33, no. 2, pp. 29–34.
8. Golubtsov V.A., Lunev V.V. *Modifitsirovanie stali dlya otlivok i sliikov* [Modification of steel for castings and ingots]. Chelyabinsk – Zaporizhia: ZNTU, 2009, 356 p. (In Russ.).
9. Pilyushenko V.L., Vikhleshchuk V.A. *Nauchnye i tekhnologicheskie osnovy mikrolegirovaniya stali* [Scientific and technological basis of steel microalloying]. Moscow: Metallurgiya, 2000, 384 p. (In Russ.).
10. Lyakishev N.P., Pliner Yu.L., Lappo S.I. *Borsoderzhashchie stali i splavy* [Boron-containing steels and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 191 p. (In Russ.).
11. Sofrygina O.A., Zhukova S.Yu., Bityukov S.M., Pyshmintsev I.Yu. Development of HSLA-steels for production of high-strength oil country tubular goods of API Spec5CT. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 7, pp. 43–49. (In Russ.).
12. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Smirnov L.A., Sychev A.V., Akberdin A.A., Kim A.S., Vitushchenko M.F., Dobromilov A.A. Production technology for low-carbon, low-sulfur boron steel. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 11, pp. 883–886.
13. Machikin V.I., Manyak N.A., Manyak L.K., Melakh A.G., Akulov V.V., Volkova V.V. Boron and non-metallic inclusions in low-alloy steel. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 1986, no. 3, pp. 15–16. (In Russ.).
14. Heckmann C.J., Ormston D., Grimpe F., Hillenbrand H.-G., Jansen J.-P. Development of low carbon Nb–Ti–B microalloyed steels for high strength large diameter linepipe. *Ironmaking and Steelmaking*. 2005, vol. 32, no. 4, pp. 337–341.
15. Vangaru Narasimha-Rao V., Koo Jayoung, Luton Michael J., etc. *Ultra-high strength, weldable, boron-containing steels with superior toughness*. Patent 6228183 US. Publ. 08.05.2001.
16. Asakhi Kh., Khaara T., Tzuru E., etc. *Razrabotka ul'travysokoprochnykh trub X120 UEO* [Development of ultra-high-strength X120 UEO pipes]. In: *Mezhdunarodnyi seminar "Sovremennye stali dlya gazonefteprovodnykh trub, problemy i perspektivy": sb. dokladov* [Int. seminar "Modern steels for gas and oil pipes, problems and prospects": Coll. of papers]. Moscow: Metallurgizdat, 2006, pp. 123–130. (In Russ.).
17. *Tekhnologicheskaya instruktsiya TI SK-01–2007 "Vyplavka stali v kislorodnykh konverterakh"* [TI SK-01-2007 technological instruction "Steel melting in oxygen converters"]. Temirtau: AO "Arselor-Mittal Temirtau", 2007. (In Russ.).
18. *Tekhnologicheskaya instruktsiya TI SK-07–2007 "Vnepechnaya obrabotka stali dlya slyabovykh MNLZ"* [TI SK-07-2007 technological instruction "Out-of-furnace processing of steel for slab CCM"]. Temirtau: AO "ArselorMittal Temirtau", 2007. (In Russ.).
19. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Selivanov E.N., Sychev A.V., Zolin A.N., Dobromilov A.A., Kutdusova Kh.Sh., Savrasov A.I., Kim A.S., Akberdin A.A. *Shlakovaya smes' dlya obrabotki stali v kovshe* [Slag mixture for steel processing in a ladle]. Patent no. 2562849 RF. *Byulleten' izobretenii*. 2004, no. 25. (In Russ.).
20. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Selivanov E.N., Sychev A.V. *Shlakovaya smes' dlya obrabotki stali v kovshe* [Slag mixture for steel processing in a ladle]. Patent no. 30964 RK. 2016. (In Russ.).
21. Zaitsev A.I., Kraposhin V.S., Rodionova I.G., etc. *Kompleksnyye nemetallicheskie vklyucheniya i svoystva stali* [Complex non-metallic inclusions and properties of steel]. Moscow: Metallurgizdat, 2015, 276 p. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The research was financially supported by RNF grant (project no. 16-19-10435).

**Information about the authors:**

**Babenko A.A.**, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher  
(babenko251@gmail.com)

**Zhuchkov V.I.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher  
(ntm2000@mail.ru)

**N.I. Sel'menskikh**, Research Associate

**Upolovnikova A.G.**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher  
(upol.ru@mail.ru)

Received May 15, 2018

УДК 621.891

## ИЗНОС СПЕЧЕННЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОДШИПНИКОВОЙ СТАЛИ ПРИ ГРАНИЧНОМ ТРЕНИИ С ТОКОСЪЕМОМ ПО МЕДИ\*

*Алеутдинова М.И.*<sup>1,2</sup>, к.т.н., научный сотрудник (aleut@ispms.ru)  
*Фадин В.В.*<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, старший научный сотрудник (fvv@ispms.ru)  
*Алеутдинов К.А.*<sup>3</sup>, студент

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

<sup>2</sup> Северский технологический институт НИЯУ МИФИ  
(636036, Россия, Томская обл., г. Северск, пр. Коммунистический, 65)

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
(634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30)

**Аннотация.** Изучена возможность создания высокопористых композитов состава сталь – графит путем спекания по максимально простой технологии при температуре ниже 1000 °С в электрической печи без вакуума. Основная цель исследования была оценить способность такого композита проявить высокую износостойкость при скольжении по медному контртелу под воздействием электрического тока контактной плотностью более 100 А/см<sup>2</sup>. Порошковая сталь была изготовлена путем восстановления из шлифовального шлама производства подшипников. Композиты имели низкие механические свойства и высокое удельное электрическое сопротивление. Высокая свивозная пористость была показана с помощью оптической металлографии. Триботехническое нагружение композитов было осуществлено по схеме контакта типа вал – колодка со скоростью скольжения 5 м/с и при контактном давлении 0,09 МПа. Было отмечено, что сухое трение этих композитов вызвало появление слоя переноса на поверхности скольжения медного контртела. Это привело к уменьшению электропроводности скользящего электрического контакта и увеличению общей шероховатости поверхности скольжения меди. Пропитка индустриальным маслом пористого каркаса композитов приводила к значительному увеличению удельной поверхностной электрической проводимости контакта и к снижению линейной интенсивности изнашивания по сравнению с этими же характеристиками сухого контакта. Катастрофическое изнашивание в этих условиях начиналось при контактной плотности тока 150 – 200 А/см<sup>2</sup>. Показано, что размещение свинцовой пластины и композита в держатель образца, а также осуществление их совместного скольжения под воздействием электрического тока вызывало дополнительное увеличение электрической проводимости и снижение интенсивности изнашивания до 3 – 11 мкм/км при контактной плотности тока около 250 А/см<sup>2</sup>. Катастрофическое изнашивание в присутствии свинцовой пластины и индустриального масла в зоне контакта начиналось при контактной плотности тока 250 – 300 А/см<sup>2</sup>. Установлено, что любой режим трения не приводил к разрушению поверхности скольжения меди. Зависимость характеристик контакта от концентрации графита не наблюдалась в явном виде. Сделан вывод о перспективности применения восстановленной подшипниковой стали для создания токопроводящих материалов, износостойких под воздействием электрического тока высокой контактной плотности.

**Ключевые слова:** скользящий электрический контакт, поверхностный слой, контактное падение напряжения, удельная поверхностная электрическая проводимость контакта, релаксация напряжений, спеченный композит, поровое пространство, самосмазывающееся трение.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-780-786

### ВВЕДЕНИЕ

Высокая износостойкость при скольжении должна быть обеспечена за счет высокой сдвиговой устойчивости структуры поверхностных слоев контактирующих тел. Это условие может выполняться вследствие удовлетворительной релаксации напряжений, возникающих в пятнах контакта. Обычно такая релаксация реализуется путем упругой деформации материала пятна контакта в случае, когда напряжения не превышают предел текучести в зоне трения. Тогда поверхностный слой (ПС) разрушается в условиях многоциклового усталости, что часто достигается за счет его предварительного упрочнения или за счет введения смазки в зону трения, или

другими способами. Однако экстремальное внешнее воздействие на трибосистему должно вызвать неизбежную пластическую деформацию ПС. В этом случае поверхностный слой разрушается и изнашивается в условиях малоциклового усталости, т.е. за счет накопления концентрации структурных дефектов до некоторого критического уровня [1 – 3]. Удовлетворительная релаксация напряжений за счет пластических микросдвигов в окрестности концентраторов напряжений может быть одним из путей уменьшения скорости накопления дефектов в ПС. Это значит, что материал последнего не должен быстро упрочняться, а должен сохранять пластичность в процессе трения. Эти условия могут быть выполнены за счет выбора материалов пары трения, а также за счет создания конструктивных особенностей схемы сопряжения.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 16-48-700434.

Триботехнические композиционные материалы, как правило, имеют структуру спеченного металлического каркаса, содержащего медь, железо (или сталь) и графит в качестве основных структурных составляющих [4 – 7]. Они применяются часто при сухом и граничном трении по контртелам на основе железа или меди. Иногда граничное трение обеспечивают путем самосмазывания, когда поровое пространство композита заполнено смазкой, которая поступает в зону трения [8, 9]. Экстремальные условия для этих материалов могут быть заданы разными входными параметрами трибосистемы: высокими скоростью скольжения и температурой контакта, недостатком смазки и т.п. Определение численных значений этих факторов внешнего воздействия, приводящих к разрушению и износу материала ПС, а также изучение способов уменьшения износа представляет научный интерес.

Скольжение материала при высокой контактной плотности тока является одним из видов экстремального внешнего воздействия на ПС. Сухое скольжение известных токоъемных материалов осуществляется обычно при контактной плотности тока  $j < 60 \text{ А/см}^2$  [10, 11] по медному контртелу. Скольжение с более высокой величиной  $j$  производится в присутствии смазочных материалов (фторопласта) [12], консистентной графитовой смазки [13, 14] и т.п. Удовлетворительная износостойкость достигается за счет особенностей первичной структуры [12]. Высокая износостойкость в контакте токоъемная пластина – контактный провод при высоких скорости скольжения (более 10 м/с) и плотности тока ( $100 – 200 \text{ А/см}^2$ ) обусловлена присутствием смазки и особенностью сопряжения [14]. Эта особенность заключается в том, что номинальная площадь контакта быстро двигается по пластине и по проводу. Таким образом, материал в зоне контакта находится в экстремальных условиях краткое время и не успевает достичь критического состояния. Однако представляет интерес изучить триботехническое поведение материала в более тяжелых условиях, когда его номинальная площадь постоянно находится под воздействием тока плотностью более  $100 \text{ А/см}^2$  при скольжении по меди. Спеченные материалы состава железо – графит или сталь – графит могут служить как

модельные при исследовании в этом направлении. Эти материалы должны иметь высокую пористость, так как скольжение материалов с низкой пористостью по меди вызывает разрушение ее ПС [15, 16]. Спекание материалов проводится в отсутствии кислорода, как правило, в вакууме. Иногда спекание проводится в графитовых контейнерах, где кислород связывается углеродом и образуется угарный газ СО. В этом случае возможна цементация пористого стального каркаса через газовую фазу [17], что не является желательным для достижения высокой электропроводности контакта. Поэтому представляется целесообразным изменить способ защиты порошкового брикета материала от воздействия кислорода и монооксида углерода, но спекание провести в воздушной среде.

Целью настоящей работы является создание высокопористых композитов на основе порошковой подшипниковой стали, спеченных в воздушной среде, а также изучение возможности достижения их высокой износостойкости при скольжении по меди под воздействием электрического тока контактной плотностью выше  $100 \text{ А/см}^2$  в присутствии смазки.

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Порошок подшипниковой стали марки ШХ15 был получен восстановлением из шлифовальных отходов производства шариковых подшипников по методике, представленной в работе [18], и служил основой модельных композитов. Порошковые смеси сталь – Гр (Гр – графит) были спрессованы при давлении 550 МПа и помещены в алундовый тигель. После этого тигель был заполнен порошком керамики  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Порошок графита был расположен сверху порошка  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Тигель был помещен в электрическую печь, где было проведено спекание спрессованных смесей при температуре  $960 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 3 ч. Металлографическое изучение сечения поверхностного слоя проведено на оптическом микроскопе Альтами МЕТ 1С. Свойства (твердость НВ по Бринеллю, предел прочности  $\sigma$  при изгибе, удельное электросопротивление  $\rho$ , пористость  $\Pi$ ) спеченных композитов определены по стандартным методикам и представлены в таблице.

#### Некоторые свойства модельных порошковых композитов и характеристики их скользящего электроконтакта в режиме самосмазывания при отсутствии свинцовой пластины

##### Some properties of model powder composites and the characteristic of their sliding electric contact under self-lubricating mode at lead plate absence

Материал	НВ, МПа	$\sigma$ , МПа	$\rho$ , $10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\Pi$ , %	$j$ , $\text{А/см}^2$	$r_s^{-1}$ , $\text{см/см}^2$	$I_h$ , $\text{мкм/км}$
Сталь	246	4	91	36	160	123	0
Сталь – 8 % Гр	264	2	106	43	150	130	22
Сталь – 16 % Гр	340	3	109	45	150	136	33
Сталь – 22 % Гр	173	1	118	52	160	150	38

Интенсивность изнашивания и электропроводность скользящего контакта определены в условиях при переменном токе 50 Гц, давлении  $p = 0,09$  МПа, скорости скольжения  $v = 5$  м/с на машине трения СМТ-1 по схеме вал – колодка (рис. 1, а). Композиты были пропитаны индустриальным маслом марки И-20 при комнатной температуре. Контртелом служила медь марки М1 (99,9 % Cu). Дистанция скольжения составляла 9 км при каждой плотности тока. Линейная интенсивность изнашивания определена как  $I_h = h/L$ , где  $h$  – изменение высоты образца на дистанции скольжения  $L$ . Контактная плотность тока определена как  $j = i/A_a$ ; здесь  $i$  – ток, протекающий через номинальную площадь  $A_a$  контакта.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Низкие значения механических свойств и высокое удельное электросопротивление (см. таблицу) обусловлены высокой пористостью и слабой связью между частицами композита, что связано со спецификой его получения (низкая температура спекания, возможное слабое окисление межчастичных контактов в каркасе, низкое давление прессования и т.п.). Видно также (рис. 1, б), что поровое пространство является сквозным во всех композитах, что приводит к их быстрой пропитке маслом.

В настоящей работе учтено, что свинец часто применяется в качестве твердой смазки и структурной составляющей триботехнического композита [4]. Поэтому было предположено, что свинцовая пластина толщиной 1,5 мм способна быть твердой смазкой и вызвать уменьшение износа, если она изнашивается совместно с образцом (рис. 1, а). Низкие механические свойства и высокое электросопротивление являются причиной быстрого изнашивания непропитанных композитов в присутствии свинцовой пластины и без нее. Кроме того, возникает слой переноса на поверхности скольжения меди, что резко снижает электропроводность контакта и увеличивает ее общую шероховатость. Но разрушение поверхности скольжения меди отсутствует. Это значит, что сухое трение этих композитов не может иметь перспективы для дальнейших экспериментов. Пропитанные маслом композиты в присутствии свинцовой пластины и без нее при скольжении с токоъемом не характеризуются заметными структурными изменениями в ПС (рис. 1, б). Визуально наблюдаются участки меди на поверхности скольжения композитов вследствие переноса. Пропитанные композиты формируют удовлетворительный скользящий электроконтакт в случае неполного заполнения порового пространства маслом. Если поровое пространство заполнено маслом полностью, то возникает слой масла и продуктов его деструкции на поверхности скольжения меди, что вызывает резкое уменьшение электропроводности контакта. Максимальное значение удельной поверхностной

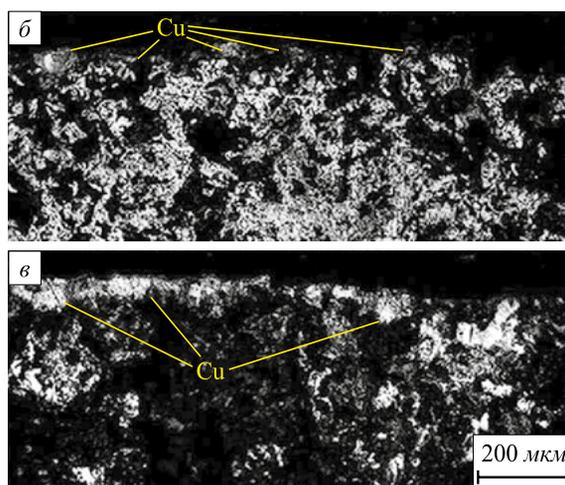
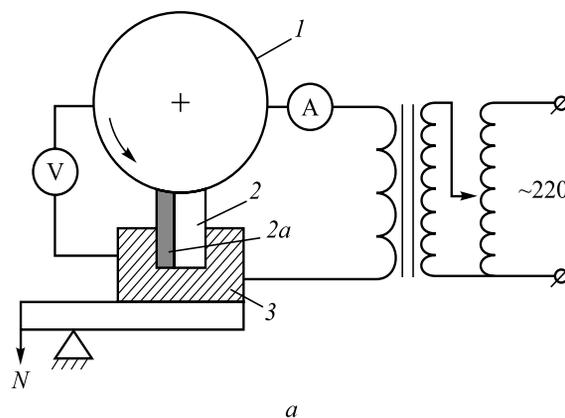


Рис. 1. Принципиальная схема трибосопряжения вал – колодка (а) (1 – контртело (медь М1); 2 – образец-композит; 2а – пластина (Pb); 3 – держатель образца); поверхностный слой и первичная структура of the sintered specimens (сталь ШХ15 (б) и композит состава сталь марки ШХ15 – 8 % Gr (в) в сечении, перпендикулярном направлению скольжения при  $j = 150$  А/см<sup>2</sup>

Fig. 1. Schematic representation of shaft – block tribocoupling (а) (1 – copper counterbody (M1 cooper); 2 – composite specimen; 2а – plate (Pb); 3 – specimen holder); surface layer and primary structure of the sintered specimens in cross-section perpendicular to the sliding direction at  $j = 150$  А/см<sup>2</sup>: б – bearing steel ShKh15, в – composite of bearing steel – 8 % graphite (ShKh15 – 8 %Gr)

электропроводности  $r_s^{-1} = j/U$  (здесь  $U$  – контактное падение напряжения) достигается при отсутствии видимой масляной пленки на поверхности скольжения меди. В этом случае скольжение происходит без образования электроразрядов в зоне контакта. Однако скольжение композитов при отсутствии свинцовой пластины при  $j > 120$  А/см<sup>2</sup> происходит с некоторым разрушением и износом ПС (см. таблицу). Катастрофическое изнашивание наступает при  $j \approx 200$  А/см<sup>2</sup> вследствие быстрого уменьшения количества масла в зоне контакта.

На рис. 2, а видно, что интенсивность изнашивания в присутствии свинца заметно ниже ( $I_h \approx 0$  при  $j \approx 150$  А/см<sup>2</sup>) по сравнению с интенсивностью изнашивания композитов без свинцовой пластины (см. таблицу). Можно видеть также (рис. 2, б), что электропроводность контакта в присутствии свинца также выше

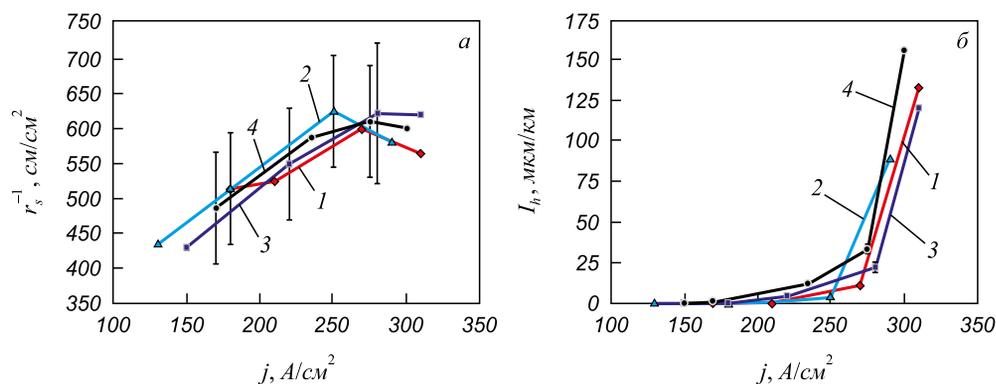


Рис. 2. Влияние контактной плотности тока на интенсивность изнашивания (а) и удельную поверхностную электропроводность (б) электроконтакта композитов на основе подшипниковой стали при скольжении по меди в условиях самосмазывания в присутствии свинцовой пластины:

1 – ШХ15 + 22 % С; 2 – ШХ15 + 16 % С; 3 – ШХ15 + 8 % С; 4 – ШХ15

Fig. 2. Influence of contact current density on wear intensity (a) and specific surface electric conductivity (б) of electric contact of composites based on bearing steel at sliding against copper under conditions of self-lubrication in the presence of a lead plate:

1 – ShKh15 + 22 % C; 2 – ShKh15 + 16 % C; 3 – ShKh15 + 8 % C; 4 – ShKh15

по сравнению с величиной  $r_s^{-1}$ , реализованной при скольжении без свинца (см. таблицу). Эти данные позволяют утверждать, что свинец может заметно улучшать характеристики контакта в некоторых случаях.

Полученные сведения (рис. 2, а, б) не дают возможности наблюдать в явном виде влияние концентрации графита на характеристики контакта. Видно лишь, что скольжение с контактной плотностью  $j < 150$  А/см<sup>2</sup> не приводит к заметному разрушению ПС композитов, так как  $I_h \approx 0$  мкм/км. Начало катастрофического изнашивания наблюдается при  $j \approx 300$  А/см<sup>2</sup> (рис. 2, а, б) и также не зависит от концентрации графита. Катастрофическое изнашивание начинается вследствие повышения средней температуры контакта до уровня, когда масло интенсивно испаряется, не обеспечивает удовлетворительную смазку и зона контакта нагревается до температуры более 700 °С (наблюдается визуально). Этот процесс проявляется появлением отрицательного наклона кривой  $r_s^{-1}(j)$  и резкого возрастания величины  $I_h$ .

Низкие механические свойства представленных композитов обусловлены низкой прочностью межчастичных контактов, но в них локализуется деформация. Это характерно для порошковых материалов при любых видах нагружения, в частности при нагружении трением. Отсюда следует, что низкая величина  $I_h$  при  $j < 300$  А/см<sup>2</sup> может указывать на возникновение низких напряжений в межчастичных контактах (а также в ПС) и на их легкую релаксацию путем упругой деформации. Низкие напряжения в ПС обусловлены наличием смазок (графитом, свинцом, маслом). Низкая прочность межчастичных контактов не способствует проявлению их высокой пластичности и даже легкой недостатку масла в зоне контакта приводит к повышению температуры, появлению малоциклового усталости и релаксации напряжений путем разрушения межчастичных контактов. Поэтому резкий переход из режима

нормального трения с низкой величиной  $I_h$  в катастрофическое изнашивание обусловлен слабостью межчастичных контактов и компенсировать их слабость не способны оставшиеся смазки (свинец и графит). Отсутствие влияния концентрации графита на характеристики контакта и на резкий переход к катастрофическому изнашиванию можно объяснить этой слабостью контактов в стальном каркасе.

Отсутствие слоя переноса на поверхности скольжения медного контртела является важным условием достижения удовлетворительной электропроводности контакта, его устойчивости и надежности в процессе трения. Ранее было отмечено [19], что высокая электропроводность скользящего электроконтакта металл – стальное контртело соответствует низкой интенсивности изнашивания. Относительно низкая величина  $I_h$  композита (и соответственно высокая  $r_s^{-1}$ ) в присутствии свинца (рис. 2, а, б) и более высокая  $I_h$  (соответственно низкая  $r_s^{-1}$ ) при его отсутствии (см. таблицу) показало, что эта закономерность может выполняться также в скользящем электроконтакте металл – медное контртело. Однако не следует обобщать эту закономерность на скользящие электроконтакты других металлических систем, так как для этого необходим более значительный объем данных. Можно утверждать, что максимальная величина  $r_s^{-1}$  может быть достигнута, в первую очередь, оптимальными пределами скорости изменения количества масла в зоне трения, что контролируется структурой порового пространства и температурой контакта. Поровое пространство следует получать с удовлетворительной перколяцией пор (рис. 1, б). Оптимальная пористость должна быть определена для каждого конкретного контакта. Температура контакта должна быть низкой, чтобы уменьшить испарение и выгорание масла в зоне контакта и, тем самым, обусловить удовлетворительную смазку и низкое значение  $I_h$ . Уве-

личение контактного давления до некоторого предела должно приводить к повышению величины  $r_s^{-1}$  и к вероятному уменьшению температуры контакта. Кроме того, максимум  $r_s^{-1}$  зависит от правильного выбора состава композита. Не исключено, что величина  $r_s^{-1}$  может быть увеличена (и уменьшено значение  $I_h$ ) за счет роста температуры спекания в рассмотренных условиях, что должно повысить прочность металлического каркаса. Но взаимосвязь этих факторов и характеристик  $r_s^{-1}$ ,  $I_h$  должна быть изучена в отдельных работах.

В общем случае получение композитов с заданными особенностями первичной структуры (выбор фазового состава, сквозная минимальная пористость, удовлетворительная прочность межчастичных и межфазных границ и т.п.) является часто трудной задачей. Представленные начальные сведения позволяют утверждать, что восстановленная сталь марки ШХ15 способна быть основой износостойких композитов, предназначенных для скользящего токосъема с плотностью тока  $j > 100$  А/см<sup>2</sup> в смазке. В настоящей работе эта износостойкость обусловлена в значительной степени особенностью конструкции трибосопряжения, а именно, присутствием свинцовой пластины. Не исключено, что свинец в виде пластины может быть более эффективным для увеличения износостойкости, чем свинец в структуре композита. Увеличение контактного давления более 0,09 МПа должно привести к увеличению износостойкости и плотности тока, соответствующим катастрофическому изнашиванию. Обычно скользящий токосъем по медному контртелу осуществляют при контактом давлении 0,02 МПа, но в некоторых экспериментах давление поднимают до 0,2 МПа [20]. Видно, что спеченные композиты состава подшипниковая сталь – графит являются вполне перспективной основой для создания токосъемных материалов, проявляющих удовлетворительную износостойкость при скольжении с контактным давлением более 0,09 МПа, плотностью тока более 100 А/см<sup>2</sup> в присутствии смазочных материалов, представленных выше.

## Выводы

Порошковая сталь, переработанная из шлифовального шлама производства подшипников, может служить основой для создания композитов, спеченных в электрических печах без применения вакуума. Спекание при температуре менее 1000 °С приводит к формированию слабой межчастичной связи в стальном каркасе и к низкой механической прочности композита состава сталь – графит. Высокая (более 35 %) сквозная пористость композита легко пропитывается нефтяным маслом и допускает скольжение композита по схеме сопряжения вал – колодка в режиме самосмазывания под воздействием электрического тока контактной плотностью более 100 А/см<sup>2</sup>. Композиты состава сталь – графит, несмотря на низкую объемную

прочность, способны осуществлять скользящий электроконтакт с интенсивностью изнашивания, близкой к нулю, при контактной плотности тока до 150 А/см<sup>2</sup>. Это указывает на их высокую прочность поверхностного слоя в определенных условиях. Катастрофическое изнашивание композитов начинается при контактной плотности тока около 300 А/см<sup>2</sup> вследствие повышения средней температуры контакта и выгорания масла в контактом пространстве. Любой режим скольжения этих композитов не приводит к увеличению шероховатости поверхности скольжения медного контртела.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ибатуллин И.Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев. – Самара: изд. Самар. гос. техн. ун-та, 2008. – 387 с.
2. Rynio C., Hattendorf H., Klöwer J., Eggeler G. The evolution of tribolayers during high temperature sliding wear // *Wear*. 2014. Vol. 315. P. 1 – 10.
3. Wang X., Wei X., Hong X., Yang J., Wang W. Formation of sliding friction-induced deformation layer with nanocrystalline structure in T10 steel against 20CrMnTi steel // *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 280. P. 381 – 387.
4. Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. – Киев: Наукова думка, 1980. – 404 с.
5. Порошковая металлургия и пыльные покрытия: Учеб. для вузов / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин и др. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
6. Ma X.C., He G.Q., He D.H., Chena C.S., Hua Z.F. Sliding wear behavior of copper-graphite composite material for use in maglev transportation system // *Wear*. 2008. Vol. 265. P. 1087 – 1092.
7. He D.H., Manory R.A. A novel electrical contact material with improved self-lubrication for railway current collectors // *Wear*. 2001. Vol. 249. P. 626 – 636.
8. Зозуля В.Д. Эксплуатационные свойства порошковых подшипников. – Киев: Наукова думка, 1989. – 287 с.
9. Zhang W., Zhang D., Le Y., Li L., Ou B. Fabrication of surface self-lubricating composites of aluminum alloy // *Applied Surface Science*. 2008. Vol. 255. P. 2671 – 2674.
10. Braunovic M., Konchits V.V., Myshkin N.K. Electrical contacts. Fundamentals, Applications and Technology. – Boca Raton: CRC Press, 2006. 672 p.
11. Senouci A., Zaidi H., Frene J., Bouhoucha A., Paulmier D. Damage of surfaces in sliding electrical contact copper/steel // *Applied Surface Science* 1999. Vol. 144-145. P. 287 – 291.
12. Argibay N., Sawyer W. G. Low wear metal sliding electrical contacts at high current density // *Wear*. 2012. Vol. 274-275. P. 229 – 237.
13. Kwok C.T., Wong P.K., Man H.C. and Cheng F.T. Sliding wear and corrosion resistance of copper-based overhead catenary for traction systems. *IJR // International Journal of Railway(Korea)*. 2010. Vol. 3. No. 1. P. 19 – 27.
14. Берент В.Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта. – М.: Интекст, 2005. – 408 с.
15. Алеутдинов К.А., Алеутдинова М.И., Фадин В.В. Влияние структуры контртела на характеристики скользящего электроконтакта металлических композитов. – В кн.: Сб. трудов Международной конференции «Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении». – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. С. 231 – 236.
16. Kovalchenko A.M., Blau P.J., Qu J., Danyluk S. Scuffing tendencies of different metals against copper under non-lubricated conditions // *Wear*. 2011. Vol. 271. P. 2998 – 3006.
17. Алеутдинова М.И., Фадин В.В., Алеутдинов К.А. Структура и изнашивание порошковой подшипниковой стали при сколь-

жени с током по меди в присутствии смазки // Перспективные материалы. 2017. № 11. С. 55 – 63.

18. Алеутдинова М.И., Борисов М.Д., Фадин В.В., Кочепасов И.И., Колубаев А.В. Структура и механические свойства порошковых материалов на основе подшипниковой стали // Изв. вуз. Черная металлургия. 2001. № 2. С. 31 – 34.
19. Fadin V.V., Aleutdinova M.I., Potekaev A.I., Kulikova O.A. The surface layer states in metallic materials subjected to dry sliding

and electric current // Russian Physics Journal. 2017. Vol. 60 (5). P. 908 – 914.

20. Чичинадзе А.В., Хованский В.Н., Преженцева Н.П. Некоторые особенности расчетно-экспериментальной оценки триботехнических характеристик сильноточных скользящих электрических контактов // Трение и износ. 1992. № 13 (1). С. 138 – 144.

Поступила 23 августа 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 10, pp. 780–786.

## WEAR OF SINTERED COMPOSITES BASED ON BEARING STEEL AT BOUNDARY FRICTION WITH CURRENT COLLECTION AGAINST COPPER

M.I. Aleutdinova<sup>1,2</sup>, V.V. Fadin<sup>1</sup>, K.A. Aleutdinov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, Russia

<sup>2</sup> Seversk Technological Institute, National Research Nuclear University, Seversk, Tomsk Region, Russia

<sup>3</sup> National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

**Abstract.** The possibility of creating a composite of steel-graphite by sintering using the simplest technology has been studied at temperature lower than 1000 °C in the electric furnace without vacuum. The main research aim was to estimate ability of such composite to show high wear resistance at sliding against copper counterbody under the influence of electric current with a contact density higher than 100 A/cm<sup>2</sup>. Powder steel has been obtained by recycling of grinding wastes of bearing production. Composites had low mechanical properties and high specific electric resistance. The high through porosity was shown by optical metallography. Tribotechnical loading of composites has been carried out according to the contact scheme “pin-on-ring” with a sliding velocity of 5 m/s and with a contact pressure of 0.09 MPa. It has been noted that dry friction of these composites has caused transfer layer emergence on the sliding surface of copper counterbody. As a result there was reduction of sliding electric contact conductivity and increase in the general copper sliding surface roughness. Impregnation by industrial oil of composites porous framework led to significant increase in specific surface contact electric conductivity and to linear wear intensity decrease comparing with the same characteristics of dry contact. Catastrophic wear under these conditions began at the contact current density of 150 – 200 A/cm<sup>2</sup>. It has been shown that the placing of lead plate and composite in the specimen holder and implementation of their joint sliding under the influence of electric current caused additional contact electric conductivity increase and wear intensity decrease to values of 3 – 11 μm/km at the contact current density about 250 A/cm<sup>2</sup>. Catastrophic wear in the presence of a lead plate and industrial oil in contact zone began at the contact current density of 250 – 300 A/cm<sup>2</sup>. Contact characteristics dependence on graphite concentration was not evidently observed. It has been established that every friction mode did not lead to copper sliding surface deterioration. It was concluded that the use of the restored bearing steel has the perspective for creation of current collection materials demonstrating high wear resistance under the influence of electric current of high contact density.

**Keywords:** sliding electric contact, surface layer, contact voltage drop, specific contact electric conductivity, stress relaxation, sintered composite, pores space, self-lubricating friction.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-780-786

### REFERENCES

- Ibatullin I.D. *Kinetika ustalostnoi povrezhdaemosti i razrusheniya povrekhnostnykh sloev: monografiya* [Kinetics of fatigue damage-ability and destruction of surface layers]. Samara: Samar. gos. tekhn. un-t, 2008, 387 p. (In Russ).
- Rynio C., Hattendorf H., Klöwer J., Eggeler G. The evolution of tribolayers during high temperature sliding wear. *Wear*. 2014, vol. 315, pp. 1–10.
- Wang X., Wei X., Hong X., Yang J., Wang W. Formation of sliding friction-induced deformation layer with nanocrystalline structure in T10 steel against 20CrMnTi steel. *Applied Surface Science*. 2013, vol. 280, pp. 381–387.
- Fedorchenko I.M., Pugina L.I. *Kompozitsionnye spechennyye antifriktsionnye materialy* [Composite sintered antifriction materials]. Kiev: Naukova dumka, 1980, 404 p. (In Russ).
- Antsiferov V.N., Bobrov G.V., Druzhinin L.K. etc. *Poroshkovaya metallurgiya i napylnyye pokrytiya: Ucheb. dlya vuzov* [Powder metallurgy and sprayed coatings]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 792 p. (In Russ).
- Ma X.C., He G.Q., He D.H., Chena C.S., Hua Z.F. Sliding wear behavior of copper-graphite composite material for use in maglev transportation system. *Wear*. 2008, vol. 265, pp. 1087–1092.
- He D.H., Manory R.A. Novel electrical contact material with improved self-lubrication for railway current collectors. *Wear*. 2001, vol. 249, pp. 626–636.
- Zozulya V.D. *Ekspluatatsionnye svoystva poroshkovykh podshipnikov* [Operational properties of powder bearings]. Kiev: Naukova dumka, 1989, 287 p. (In Russ).
- Zhang W., Zhang D., Le Y., Li L., Ou B. Fabrication of surface self-lubricating composites of aluminum alloy. *Applied Surface Science*. 2008, vol. 255, pp. 2671–2674.
- Braunovic M., Konchits V.V., Myshkin N.K. *Electrical contacts. Fundamentals, applications and technology*. Boca Raton: CRC Press, 2006, 672 p.
- Senouci A., Zaidi H., Frene J., Bouchoucha A., Paulmier D. Damage of surfaces in sliding electrical contact copper/steel. *Applied Surface Science*, 1999, vol. 144-145, pp. 287–291.
- Argibay N., Sawyer W. G. Low wear metal sliding electrical contacts at high current density. *Wear*, 2012, vol. 274-275, pp. 229–237.
- Kwok C.T., Wong P.K., Man H.C., Cheng F.T. Sliding wear and corrosion resistance of copper-based overhead catenary for traction systems. *IJR. International Journal of Railway (Korea)*. 2010, vol. 3, no. 1, pp. 19–27.
- Berent V.Ya. *Materialy i svoystva elektricheskikh kontaktov v ustroystvakh zheleznodorozhnogo transporta* [Materials and properties of electric contacts in devices of railway transport]. Moscow: Intekst, 2005, 408 p. (In Russ).
- Aleutdinov K.A., Aleutdinova M.I., Fadin V.V. Influence of counterbody structure on characteristics of sliding electric contact of metal composites. In: *Sb. trudov Mezhdunarodnoi konferentsii “Materialy i tekhnologii novykh pokolenii v sovremennom materialovedenii”* [Coll. of papers of the Int. Conf. “Materials and Technologies of New Generations in Modern Materials Science”]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2016, pp. 231–236. (In Russ).

16. Kovalchenko A.M., Blau P.J., Qu J., Danyluk S. Scuffing tendencies of different metals against copper under non-lubricated conditions. *Wear*. 2011, vol. 271, pp. 2998–3006.
17. Aleutdinova M.I., Fadin V.V., Aleutdinov K.A. Structure and wear of powder bearing steel at lubricant sliding with current collection on copper. *Perspektivnye materialy*. 2017, no. 11, pp. 55–63. (In Russ).
18. Aleutdinova M.I., Borisov M.D., Fadin V.V., Kochepasov I.I., Kolybayev A.V. Structure and mechanical properties of powder materials on base of bearing steel. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2001, no. 2, pp. 31–34. (In Russ).
19. Fadin V.V., Aleutdinova M.I., Potekaev A.I., Kulikova O.A. The surface layer states in metallic materials subjected to dry sliding and electric current. *Russian Physics Journal*. 2017, vol. 60 (5), pp. 908–914.
20. Chichinadze A.V., Khovanskii V.N., Prezhentseva N.P. Some features of settlement and experimental assessment of tribotechnical

characteristics of large current sliding electric contacts. *Trenie i iznos*. 1992, no. 13(1), pp. 138–144 (In Russ).

**Acknowledgements.** The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, no. 16-48-700434.

**Information about the authors:**

**M.I. Aleutdinova**, *Cand. Sci. Eng., Research Associate*  
(aleut@ispms.ru)

**V.V. Fadin**, *Cand. Sci. Eng., Assist. Professor, Senior Researcher*  
(fvv@ispms.ru)

**K.A. Aleutdinov**, *Student*

Received August 23, 2018

---

УДК 669.112.227:539.4

## МЕХАНИЗМЫ УПРОЧНЕНИЯ СТАЛЕЙ С БЕЙНИТНОЙ И МАРТЕНСИТНОЙ СТРУКТУРАМИ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ СЖАТИЕМ\*

*Аксёнова К.В.<sup>1</sup>, к.т.н., ассистент кафедры естественнонаучных дисциплин  
им. В.М. Финкеля (19krestik91@mail.ru)*

*Никитина Е.Н.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры менеджмента и отраслевой  
экономики (nikitina\_en@mail.ru)*

*Иванов Ю.Ф.<sup>2,3</sup>, д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник (yuf55@mail.ru)*

*Косинов Д.А.<sup>1</sup>, к.т.н., старший научный сотрудник управления  
научных исследований (УНИ) (kosinov.dima@rambler.ru)*

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

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
(634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30)

<sup>3</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН  
(634055, Россия, Томск, пр. Академический, 2/3)

**Аннотация.** Мартенсит и бейнит, формирующиеся в стали при термообработке, являются наиболее сложными структурами, в том числе и для количественной интерпретации. Часто эти стали эксплуатируются при высоких статических и динамических сжимающих напряжениях. Тщательный и всесторонний анализ структуры этих материалов после различных видов обработки позволяет грамотно использовать их для изготовления деталей и конструкций, обеспечивая комплекс необходимых физико-механических свойств. Факторами, определяющими механические свойства материалов, являются структура твердого раствора, наличие наноразмерных частиц вторых фаз, дислокационная субструктура, типы и расположение различного рода границ, внутренние поля напряжений. Для успешного управления процессом формирования структуры и фазовых состояний, определяющих механические свойства материалов, необходимо знание количественных закономерностей и механизмов деформационного упрочнения сталей различных структурных классов при активной пластической деформации. В настоящей работе методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии выполнен анализ процесса деформационного упрочнения стали 38ХНЗМФА с мартенситной структурой и стали 30Х2Н2МФА с бейнитной структурой при активной пластической деформации сжатием до 26 и 36 % соответственно. В работе рассмотрены вклады деформационного упрочнения, обусловленные внутрифазными границами, дислокационной субструктурой, карбидными фазами, атомами легирующих элементов, дальнедействующими полями напряжений. Установлено, что наибольший вклад в деформационное упрочнение закаленной стали 38ХНЗМФА дает субструктурное упрочнение, обусловленное внутренними дальнедействующими полями напряжений, и твердорастворное упрочнение, обусловленное наличием атомов углерода. Для нормализованной стали 30Х2Н2МФА упрочнение также происходит за счет действия внутренних полей напряжений, за счет внедрения атомов углерода в кристаллическую решетку феррита, а также фрагментации структуры при степени деформации, превышающей 26 %. Сравнительно малый вклад в упрочнение этих сталей вносят дислокационная субструктура и частицы карбидной фазы. Показано, что причина разупрочнения бейнитной стали при больших (более 15 %) степенях деформации связана с активацией процесса деформационного микродвойникования.

**Ключевые слова:** сталь, мартенсит, бейнит, упрочнение, механизмы, деформация, микродвойникование.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-787-793

### ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия большое внимание уделяется количественной оценке различных физических свойств сталей. Значительный прогресс в понимании механических свойств сталей достигнут в результате анализа микроструктур [1 – 5]. Отдельное внимание сконцентрировано на проблеме прочности, особеннос-

ти которой в настоящее время могут быть предсказаны во многих случаях с достаточной достоверностью по известным составу сплавов и микроструктуре [1, 5].

Явление упрочнения часто исследуют на физических моделях; в некоторых случаях используют эмпирические или полуэмпирические предположения, в особенности, когда необходимо описать свойства сложных микроструктур, формирующихся в стали (мартенсит или бейнит).

В работах [6 – 8] показано, что высокий уровень физико-механических свойств конструкционных сталей, широко применяемых в промышленности, обусловлен мартенситной или бейнитной структурой.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 16-08-00385-а) и стипендии Президента Российской Федерации для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики (проект СП 1335.2016.1).

Для успешного использования характерной для сталей прочности и получения оптимального сочетания свойств, необходимых для применения сталей, большую роль играет понимание механизма их упрочнения. Кроме того, необходимо знать факторы, контролирующие этот механизм, и его влияние на многие другие свойства, особенно вязкость и пластичность.

Целью настоящей работы является анализ эволюции механизмов упрочнения сталей с бейнитной и мартенситной структурами на различных стадиях пластической деформации.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала исследования использовали конструкционные стали марок 38ХН3МФА и 30Х2Н2МФА [9]. Стали подвергали аустенитизации при температуре 960 °С в течение 1,5 ч и охлаждали в воде (сталь 38ХН3МФА) или на воздухе (сталь 30Х2Н2МФА). Деформацию стали (образцов в виде столбиков размерами 4×4×6 мм) с мартенситной и бейнитной структурами проводили при комнатной температуре одноосным сжатием с различной степенью деформации ( $\epsilon$ ) со скоростью примерно  $7 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  на испытательной машине типа «Инстрон-1185» при автоматической записи нагрузки и удлинения. Исследования структуры и фазового состава стали осуществляли методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг [10 – 12]. Методики определения параметров структуры по электронно-микроскопическим снимкам подробно описаны в работах [13 – 16].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выполнены электронно-микроскопические микро-дифракционные исследования. После указанной выше

термической обработки в результате сдвигового механизма  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения в стали 38ХН3МФА сформирована структура пакетного (реечного) мартенсита (рис. 1, а); в стали 30Х2Н2МФА – структура нижнего бейнита (рис. 1, б). В объеме реек присутствуют частицы цементита (более крупные в стали 30Х2Н2МФА с бейнитной структурой) и дислокационная субструктура сетчатого типа, скалярная плотность дислокаций которой выше в стали 38ХН3МФА – примерно  $1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , в стали 30Х2Н2МФА –  $\sim 0,7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Более подробно эволюция структуры и фазового состава сталей и параметры, характеризующие поведение структуры при деформации, рассмотрены и описаны в работах [17 – 20].

На основании результатов исследования структуры сталей [17 – 20] были проведены оценки величин вкладов следующих механизмов торможения движущихся дислокаций: на дислокациях «леса», частицах цементита, внутрифазных границах, путем взаимодействия с внутренними полями напряжений. Оценку вкладов различных механизмов упрочнения (и суммарной прочности) сталей проводили на различных стадиях деформационного упрочнения. Это позволило провести анализ эволюции механизмов упрочнения и прочности сталей в целом в зависимости от степени деформации.

Кристаллы мартенсита и нижнего бейнита в исходном состоянии были фрагментированы, то есть разделены на области с малоугловой разориентацией. Выполненные исследования показали, что продольные размеры фрагментов в кристаллах мартенсита существенно больше, чем в кристаллах нижнего бейнита. Деформация стали сопровождается уменьшением продольных размеров фрагментов путем деления фрагментов формирующимися субграницами. При этом в кристаллах мартенсита этот процесс протекает более интенсивно. В стали 30Х2Н2МФА при  $\epsilon > 26\%$  изменение средних размеров фрагментов практически пре-

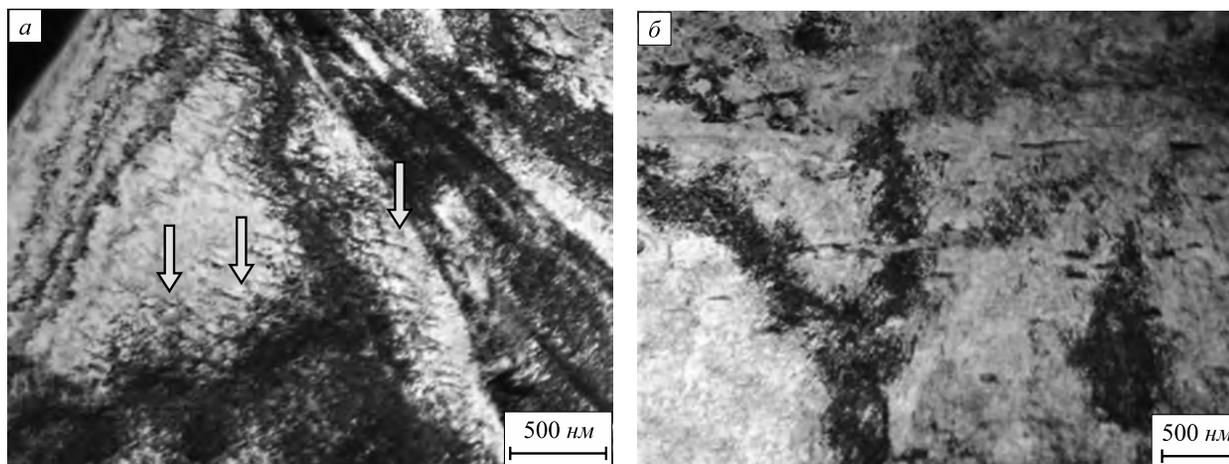


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение структуры стали 38ХН3МФА (а) и стали 30Х2Н2МФА (б) перед деформацией (стрелками на поз. а указаны частицы цементита в кристаллах пакетного мартенсита)

Fig. 1. Electron microscopy image of steel structure deformation: а – 38CrNi3MoV steel; б – 30Cr2Ni2MoV steel. The arrows in (а) point to cementite particles in crystals of packet martensite

крашается. Можно предположить, что размеры фрагментов достигают некоторого критического значения (примерно 200 нм).

Упрочнение материала малоугловыми границами (субструктурное упрочнение, упрочнение границами пластин и фрагментов) можно оценить, используя соотношение Холла–Петча [21]:

$$\sigma(L) = \sigma_0 + k^* L^{-m}, \quad (1)$$

где  $m = 1$  или  $1/2$ ;  $L$  – эффективный размер пластин феррита и фрагментов, определяемый эффективной длиной плоскости скольжения в пластине бейнита или мартенсита.

Установлено, что при  $m = 1$  значение  $k$  изменяется от 0,015 до 0,010 кгс/мм; при  $m = 1/2$  значение  $k$  изменяется в пределах от 0,20 до 0,98 кгс/мм<sup>3/2</sup> [22, 23].

При расчетах использовали следующие значения параметров:  $L$  – средние продольные размеры фрагментов;  $k = 0,015$ ;  $m = 1$ . Первый член  $\sigma_0$  в уравнении (1) представляет собой напряжение трения решетки материала, то есть напряжение, необходимое для движения дислокаций в чистых монокристаллах (например, напряжение Пайерлса для чистых металлов). Для сталей обычно используется величина  $\sigma_0$ , равная 30 – 40 МПа [13].

В таблице приведены значения вклада от внутрифазных границ (границ зерен, пакетов, кристаллов мартенсита и фрагментов) в деформационное упрочнение сталей с мартенситной и бейнитной структурами в зависимости от степени деформации. Отчетливо видно, что с увеличением степени деформации сталей величина упрочнения границами фрагментов возрастает, причем для бейнитной стали интенсивнее, чем для мартенситной, что обусловлено уменьшением средних размеров фрагментов.

Пластическая деформация сталей приводит к увеличению скалярной плотности дислокаций до  $1,3 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup>, тип дислокационной структуры при этом не меняется.

Напряжение, необходимое для поддержания пластической деформации, то есть напряжение течения ( $\sigma$ ) связано с плотностью дислокаций следующим образом [1, 2, 23]:

$$\sigma = \sigma_0 + k\sqrt{\rho},$$

здесь  $\sigma_0$  – напряжение течения недислокационного происхождения (обусловленное иными механизмами упрочнения);  $\rho$  – средняя (скалярная) плотность дислокаций;  $k = \alpha Gb$ ;  $m$  – ориентационный фактор Шмида;  $\alpha$  – параметр, характеризующий величину междислокационных взаимодействий ( $\alpha = 0,1 \div 0,51$  [24];  $G \approx 80$  ГПа – модуль сдвига;  $b = 0,25$  нм – вектор Бюргера дислокации).

Для сталей с учетом ориентационного множителя  $m$  обычно принимают  $\alpha \approx 0,5$ .

С увеличением степени деформации исследуемых сталей величина вклада, определяемого скалярной плотностью дислокаций, в деформационное упрочнение увеличивается пропорционально росту скалярной плотности дислокаций, изменяясь аналогичным образом в пределах от 275 ÷ 290 до 360 МПа (см. таблицу).

Важную роль в формировании предела текучести, деформационном упрочнении и разрушении кристаллических материалов играют дальнедействующие поля внутренних напряжений, формируемые совокупностью дефектов материала [2, 25 – 27].

Величину дальнедействующих полей внутренних напряжений оценивают по соотношению [22]:

$$\sigma(h) = \alpha_c Gb\sqrt{\rho_{\pm}} = \alpha_c Gb\sqrt{\frac{1}{b} \frac{\partial \varphi}{\partial \ell}} = \alpha_c G\sqrt{\frac{0,017b}{h}}, \quad (2)$$

#### Величины вкладов в напряжение течения при различной степени деформации сталей с мартенситной и бейнитной структурами

##### Values of contributions to flow stress by deformation degree of steels with martensite and bainite structures

Вклад в напряжение	Значение вклада в напряжение, МПа, при степени деформации, %, стали со структурой						
	мартенситной			бейнитной			
	0	10	26	0	10	26	36
$\Delta\sigma(L)$ – вклад, обусловленный внутрифазными границами	440	450	480	300	320	600	800
$\Delta\sigma(\rho)$ – вклад, обусловленный дислокационной субструктурой	290	340	360	275	320	350	360
$\Delta\sigma(h)$ – вклад, обусловленный дальнедействующими полями напряжений	280	700	900	425	554	660	733
$\Delta\sigma(c)$ – вклад, обусловленный присутствием частиц карбидных фаз	200	300	280	260	220	250	210
$\Delta\sigma(C)$ – вклад, обусловленный атомами легирующих элементов	660	790	800	490	570	630	740

где  $\alpha_c = 1$  – коэффициент Струнина [28];  $h$  – средние поперечные размеры изгибного экстинкционного контура.

Выполненные в работах [17–20] исследования показали, что средние поперечные размеры контуров уменьшаются с ростом степени деформации сталей. Согласно выражению (2) величина действующих полей внутренних напряжений будет увеличиваться: это обусловлено ростом кривизны-кручения кристаллической решетки сталей вследствие несовместности деформации кристаллов бейнита и мартенсита, зерен и частиц карбидной фазы. Величина этого вклада значительно увеличивается (см. таблицу) в пределах 280–900 МПа для мартенситной стали и 425–733 МПа для бейнитной стали.

Как отмечалось выше, в сталях перед деформированием присутствуют частицы карбида железа (цементит) пластинчатой (игольчатой) морфологии. Эволюция состояния карбидной фазы сталей при пластической деформации подробно рассмотрена в работах [18, 19]. Частицы являются препятствием движению дислокаций, что приводит к упрочнению материала. Упрочнение стали существенным образом зависит от того, какие частицы присутствуют в материале: когерентные или некогерентные. Принимаем критический для перерезания частиц размер  $D_{кр}$  [29]:

$$D_{кр} = \frac{4G_m b^2}{0,33\pi b_b G_b};$$

здесь  $G_b$  – модуль сдвига частицы;  $b_b$  – вектор Бюргера дислокации, движущейся в частице.

Для большинства частиц, выделяющихся в стали,  $D_{кр} \leq 5$  нм. Частицы большего размера не перерезаются движущимися дислокациями.

Выполненные в работах [17–20] исследования структуры и фазовых состояний показывают, что в исследуемых сталях присутствуют частицы цементита, размеры которых перед деформацией превышают значения  $D_{кр}$ . Следовательно, оценки упрочнения сталей при деформации, учитывающие присутствие частиц цементита, следует осуществлять по соотношениям, полученным для некогерентных выделений [30]:

$$\sigma_{ор} = M \frac{mG_m b}{2\pi(\lambda - D)} \Phi \ln \left( \left| \frac{\lambda - D}{4b} \right| \right),$$

здесь  $\lambda$  – среднее расстояние между частицами;  $D$  – средний размер частиц;  $m$  – ориентационный множитель, равный для ОЦК материалов 2,75 [31];  $\Phi = 1$  для винтовой и  $\Phi = (1 - \nu)^{-1}$  для краевой дислокаций;  $M = 0,81 \div 0,85$  – параметр, учитывающий неравномерность распределения частиц в матрице [30].

По данным таблицы можно сделать вывод, что с увеличением степени деформации стали 38ХНЗМФА до 10 % величина данного вклада увеличивается в пре-

делах от 200 до 300 МПа. При дальнейшей деформации стали вклад в упрочнение материала от частиц цементита снижается, что обусловлено их растворением. Для стали 30Х2Н2МФА величина данного вклада изменяется сложным образом в пределах от 260 до 210 МПа, что может быть обусловлено процессами растворения и повторного выделения частиц цементита при деформации стали.

Присутствие в сталях атомов углерода и внедрение их в кристаллическую решетку приводит к ее асимметричному искажению, что способствует существенному упрочнению материала. Предполагая аддитивность вкладов в упрочнение отдельных легирующих элементов, для расчета твердорастворного упрочнения сложнолегированных сталей обычно используют приближенные эмпирические формулы следующего типа [1, 13]:

$$\sigma_r = \sum_{i=1}^m (k_i c_i), \quad (3)$$

где  $k_i$  – коэффициент упрочнения феррита, представляющий собой прирост предела текучести при растворении в нем 1 % (по массе)  $i$ -го легирующего элемента;  $c_i$  – концентрация  $i$ -го элемента, растворенного в феррите, % (по массе). Значения коэффициента  $k_i$  для различных элементов определяются экспериментально [1, 13].

Для закаленной стали 38ХНЗМФА вклад в напряжение течения от наличия атомов внедрения (углерод) и замещения (никель, хром, молибден, ванадий), рассчитанный по выражению (3), с ростом степени деформации увеличивается в пределах 660–800 МПа, а для бейнитной стали с 490 до 740 МПа (см. таблицу). Это обусловлено растворением частиц цементита, внедрением части атомов углерода в кристаллическую решетку железа и осаждением на дислокациях.

Сопоставляя величины вкладов в деформационное упрочнение сталей (см. таблицу), можно сделать вывод, что наибольший вклад в упрочнение для мартенситной стали вносят далекодействующие поля напряжений и твердорастворное упрочнение. При этом вклад от далекодействующих полей напряжений увеличивается с ростом степени деформации стали, а вклад от твердорастворного упрочнения резко возрастает на начальном этапе деформации стали, выходя на насыщение после  $\epsilon \approx 10$  %. Остальные вклады с ростом степени деформации изменяются незначительно и заметно уступают по величине первым двум. Для бейнитной стали примерно одинаковый вклад также вносят далекодействующие поля напряжений, твердорастворное упрочнение и, кроме того, на заключительной стадии деформирования (>26 %), субструктурное упрочнение (упрочнение внутрифазными границами).

Общий предел текучести стали можно представить в виде линейной суммы вкладов отдельных механизмов упрочнения [1, 13, 32, 33]:

$$\sigma = \Delta\sigma_0 + \Delta\sigma(L) + \Delta\sigma(\rho) + \Delta\sigma(h) + \Delta\sigma(\text{ч}) + \Delta\sigma(C),$$

где  $\Delta\sigma_0$  – вклад, обусловленный трением решетки матрицы;  $\Delta\sigma(L)$  – вклад, обусловленный внутрифазными границами;  $\Delta\sigma(\rho)$  – вклад, обусловленный дислокационной субструктурой;  $\Delta\sigma(h)$  – вклад, обусловленный далекодействующими полями напряжений;  $\Delta\sigma(\text{ч})$  – вклад, обусловленный присутствием частиц карбидных фаз;  $\Delta\sigma(C)$  – вклад, обусловленный атомами легирующих элементов.

Принцип аддитивности предполагает независимое действие каждого из механизмов упрочнения на предел текучести материала.

На рис. 2 приведены кривые деформационного упрочнения сталей с мартенситной и бейнитной структурами, рассчитанные по результатам оценок механизмов упрочнения (кривые 1, 3) и выявленные экспериментально (кривые 2). Отчетливо видно, что зависимость  $\sigma - \varepsilon$ , полученная при анализе механизмов упрочнения сталей в результате аддитивного сложения вкладов (кривые 1), при степенях деформации, превышающих 15 %, располагаются существенно выше значений, выявленных экспериментально (кривые 2). С ростом степени деформации расхождение экспериментально полученных и теоретически рассчитанных кривых деформационного упрочнения сталей усиливается.

Согласно результатам работы [34] можно предположить, что выявленные расхождения экспериментально полученной и теоретически рассчитанной кривых деформационного упрочнения бейнитной стали, наиболее значимые при больших степенях деформации, обусловлены включением в процесс деформирования стали микродвойникования. Установлено [19, 20], что при степенях деформации 5 и 10 % деформационное двойникование стали выражено слабо. При увеличении степени деформации объемная доля материала, охваченного деформационным микродвойникованием, существенно увеличивается. Поэтому можно сделать вывод о том, что механическое микродвойникование влечет за собой ориентационное разупрочнение стали и облегчает процесс скольжения дислокаций.

Для стали с мартенситной структурой дополнительно была рассчитана кривая деформационного упрочнения по принципу квадратичного сложения вкладов механизмов упрочнения от равнопрочных препятствий (то есть при  $\Delta\sigma_1 \approx \Delta\sigma_2$ ), предложенному в работах [1, 3, 35]:

$$\sigma = \sqrt{\Delta\sigma_1^2 + \Delta\sigma_2^2}.$$

Отчетливо видно, что при аддитивном сложении вкладов различных механизмов упрочнения стали (рис. 2, а, кривая 1) расхождение между теоретически рассчитанной и экспериментально полученной зависимостями достигает 700 МПа. При применении принципа квадратичного сложения вкладов механизмов

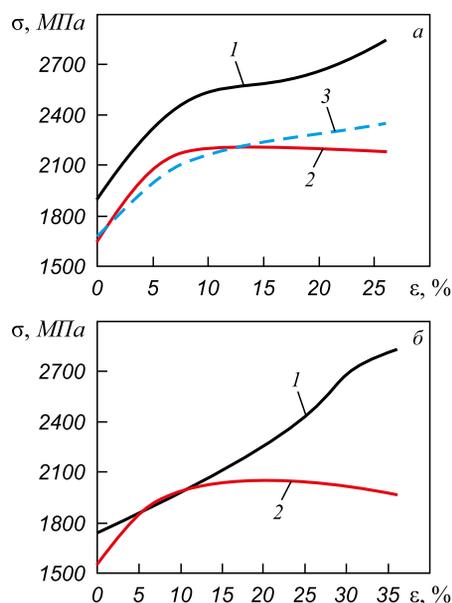


Рис. 2. Кривые деформационного упрочнения сталей 38ХН3МФА (а) и 30Х2Н2МФА (б) теоретические (кривые 1, 3) и экспериментальные (кривые 2):

— аддитивное сложение вкладов в упрочнение стали;  
 --- квадратичное сложение равнопрочных вкладов (вклады от далекодействующих полей напряжений и твердорастворного упрочнения)

Fig. 2. The curves of cold hardening of 38CrNi3MoV (a) and 30Cr2Ni2MoV (b) steels calculated theoretically (curves 1, 3) and detected in experiment (curves 2):

— additive composition of the contributions to steel hardening;  
 --- quadratic composition of full-strength contributions (contributions from long-range stress fields and solid solution strengthening)

упрочнения от равнопрочных препятствий (рис. 2, а, кривая 3 – квадратичное сложение вкладов от далекодействующих полей напряжений и твердорастворного упрочнения) качественно и количественно согласуются теоретические оценки и экспериментальные результаты. В этом случае максимальное расхождение составляет 150 МПа.

## Выводы

На основании результатов количественного анализа структуры стали с мартенситной и бейнитной структурами, подвергнутых одноосной деформации сжатием, проведены оценки механизмов упрочнения. Анализ природы деформационного упрочнения сталей показал, что упрочнение исследуемых сталей носит многофакторный характер. Наибольший вклад в величину деформационного упрочнения исследуемых сталей дает упрочнение, обусловленное далекодействующими внутренними полями напряжений, и твердорастворное упрочнение, обусловленное внедрением атомов углерода в кристаллическую решетку феррита. Для бейнитной стали при больших степенях деформации увеличивается доля вклада упрочнения, обусловленного внутрифазными границами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пикеринг Ф.Б. Физическое металловедение и разработка сталей. – М.: Металлургия, 1982. – 184 с.
2. Штремель М.А. Прочность сплавов. Часть II. Деформация. – М.: МИСИС, 1997. – 27 с.
3. Физика и механика волочения и объемной штамповки / В.Е. Громов, Э.В. Козлов, В.И. Базайкин и др. – М.: Недра, 1997. – 293 с.
4. Kelly A., Nicholson R.B. Strengthening Methods in Crystals. – Elsevier, 1971. – 214 p.
5. Fleischer R.L., Hibberd W.R. The relation between the structure and mechanical properties of metals. – H.M.S.O., 1963. – 203 p.
6. Курдюмов В.Г., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. – М.: Наука, 1977. – 236 с.
7. Sourmail T., Smanio V. Low temperature kinetics за bainite formation in high carbon steels // Acta Materialia. 2013. Vol. 61. No. 7. P. 2639 – 2648.
8. Borgenstam A., Hillert M., Agren J. metallographic evidence of carbon diffusion in the growth of bainite // Acta Materialia. 2009. Vol. 57. No. 11. P. 3242 – 3252.
9. Приданцев М.В., Давыдова Л.Н., Тамарина А.М. Конструкционные стали: Справочник. – М.: Металлургия, 1980. – 288 с.
10. Egerton R.F. Physical Principles of Electron Microscopy. An Introduction to TEM, SEM, and AEM. – Berlin: Springer Science+Business Media, Inc, 2005. – 211 p.
11. Kumar C.S.S.R. Transmission Electron Microscopy Characterization of Nanomaterials. – New York: Springer, 2014. – 717 p.
12. Barry Carter C., David B. Transmission Electron Microscopy. – Berlin: Springer International Publishing, 2016. – 518 p.
13. Гольдштейн М.И., Фарбер Б.М. Дисперсионное упрочнение стали. – М.: Металлургия, 1979. – 208 с.
14. Hirsch P.B., Howie A., Nicholson R.B., Pashley D.W., Whelan M.J. Electron Microscopy of Thin Crystals. – Washington: Butterworth, 1965. – 574 с.
15. Чернявский К.С. Стереология в металловедении. – М.: Металлургия, 1977. – 208 с.
16. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металловедении. – М.: Металлургия, 1973. – 584 с.
17. Ivanov Y.F., Kolubaeva Y.A., Kornet E.V., Gromov V.E. Formation of the fine structure and phase composition of structural steel on quenching // Steel in Translation. 2009. Vol. 39. No. 4. P. 302 – 306.
18. Иванов Ю.Ф., Корнет Е.В., Громов В.Е., Коновалов С.В. Структурно-фазовые превращения в закаленной конструкционной стали при деформации // Успехи физики металлов. 2009. Т. 10. № 4. С. 391 – 416.
19. Громов В.Е., Никитина Е.Н., Иванов Ю.Ф. Эволюция карбидной и дефектной подсистем стали с бейнитной структурой при деформации // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2015. № 3. С. 74 – 80.
20. Gromov V.E., Nikitina E.N., Ivanov Yu.F., Aksenova K.V. Regularities of bainitic steel deformation transition // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 150. No. 012025.
21. Naylor I.R. The influence of the lath morphology on the yield strength and transition temperature on martensite-bainite steel // Met. Trans. 1979. Vol. 10A. No. 7. P. 873 – 891.
22. Бельский Б.З., Фарбер Б.М., Гольдштейн М.И. Оценки прочности малоуглеродистых низколегированных сталей по структурным данным // Физика металлов и металловедение. 1975. Т. 39. № 3. С. 403 – 409.
23. Деформационное упрочнение и разрушение поликристаллических металлов / В.И. Трефилов, В.И. Моисеев, Э.П. Печковский и др. – Киев: Наукова думка, 1987. – 248 с.
24. МакЛин Д. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1965. – 431 с.
25. Конева Н.А., Козлов Э.В. Природа субструктурного упрочнения // Изв. вуз. Физика. 1982. № 8. С. 3 – 14.
26. Конева Н.А., Козлов Э.В. Физика субструктурного упрочнения // Вестник ТГАСУ. 1999. № 1. С. 21 – 35.
27. Kocks U.F. Statistical treatment of penetrable obstacles // Canadian Journal of Phys. 1967. Vol. 45. No. 2. P. 737 – 755.
28. Струнин Б.М. Вероятностное описание поля внутренних напряжений при случайном расположении дислокаций // Физика твердого тела. 1971. Т. 13. № 3. С. 923 – 926.
29. Mott N.F., Nabarro F.R.N. The distribution of dislocations in slip band // Proc. Phys. Soc. 1940. Vol. 52. No. 1. P. 86 – 93.
30. Ashby M.F. Physics of Strength and Plasticity. – MIT press Cambridge, Mass., 1969. – 113 p.
31. Tekin E., Kelly P.M. Tempering of steel Precipitation from iron base alloys. – Gordon: Breach, 1965. – 283 p.
32. Norstrom L.A. On the yield strength of quenched low-alloy lath martensite // Scandinavian J. of Met. 1976. Vol. 5. No. 4. P. 159 – 165.
33. Прыка Т. Количественные соотношения между параметрами дисперсных выделений и механическими свойствами сталей // Металловедение и термическая обработка стали. 1979. № 7. С. 3 – 8.
34. Киселева С.Ф., Попова Н.А., Конева Н.А., Козлов Э.В. Влияние микродвойников превращения на избыточную плотность дислокаций и внутренние напряжения деформированного ГЦК-материала // Изв. РАН. Серия физическая. 2012. Т. 76. № 13. С. 70 – 74.
35. Orowan E. Conditions for dislocation passage of precipitates // Proc. Symp. Intern. Stress in metals and alloys. – London: Inst, met., 1948. P. 451 – 454.

Поступила 12 декабря 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 10, pp. 787–793.

HARDENING MECHANISMS OF STEELS WITH BAINITE AND MARTENSITE STRUCTURES AT COMPRESSIVE DEFORMATION

K.V. Aksenova<sup>1</sup>, E.N. Nikitina<sup>1</sup>, Yu.F. Ivanov<sup>2,3</sup>, D.A. Kosinov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

<sup>3</sup>Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russia

**Abstract.** Martensite and bainite are the most complex structures being formed in steel in heat treatment including the quantitative interpretation. On frequent occasions, the application field of these steels includes the operation at high static and dynamic compression stresses. The thorough and comprehensive analysis of the materials' structure

after different types of treatment enables to use them competently for the manufacturing of the parts and structures providing them with the necessary complex of physical and mechanical properties. The factor determining the mechanical properties of the materials are the structure of solid solution, presence of nano-dimensional particles of the second phases, dislocation substructure, types and location of various boundaries and internal stress fields. For successful control of the formation of structural phase states and mechanical properties of the material it is necessary to know the quantitative laws and the cold hardening mechanisms of steels of different structural classes at active plastic deformation. By methods of transmission electron diffraction microscopy the analysis of cold hardening of 38CrNi3MoV steel with martensite and 30Cr2Ni2MoV steel with bainite structures at active plastic compression defor-

mation to 26 % and 36 %, respectively, was done in the research. The contributions caused by intraphase boundaries, dislocation substructure, carbide phases, atoms of alloying elements and long-range stress fields are considered. It is established that the substructural hardening (caused by the internal long-range stress fields) and solid solution strengthening (caused by carbon atoms) give largest contribution to cold hardening of 38CrNi3MoV hardened steel. For normalization of 30Cr2Ni2MoV steel hardening also takes place at the expense of the internal stress field's action, at the penetration of carbon atoms to the ferrite crystal lattice as well as at the structural fragmentation with the deformation degree higher than 26 %. The dislocation substructure and the particles of carbide phase make comparatively small contribution to the hardening of these steels. It is shown that the cause of bainite steel softening at large (more than 15 %) degrees of deformation is connected with the activation of deformation microtwinning process.

**Keywords:** steel, martensite, bainite, hardening, mechanisms, deformation, microtwinning.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-10-787-793

## REFERENCES

- Pickering F.Brian. *Physical metallurgy and the design of steels*. Applied Science Publishers, 1978, 275 p. (Russ.ed.: Pickering F.B. *Fizicheskoe metallovedenie i razrabotka stalei*. Moscow: Metallurgiya, 1982, 182 p.).
- Shtremel' M.A. *Prochnost' splavov. Chast' II. Deformatsiya. Uchebnik dlya VUZov* [Strength of alloys. Part II. Deformation. Textbook for universities]. Moscow: MISIS, 1997, 527 p. (In Russ.).
- Gromov V.E., Kozlov E.V., Bazaikin V.I., Tsellermaer V.Ya., Ivanov Yu.F. etc. *Fizika i mekhanika volocheniya i ob'emnoi shtampovki* [Physics and mechanics of drawing and forging]. Moscow: Nedra, 1997, 293 p. (In Russ.).
- Kelly A., Nicholson R.B. *Strengthening Methods in Crystals*. Elsevier, 1971, 214 p.
- Fleischer R.L., Hibberd W.R. *The relation between the structure and mechanical properties of metals*. H.M.S.O., 1963, 203 p.
- Kurdyumov V.G., Utevsii L.M., Entin R.I. *Prevrashcheniya v zheleze i stali* [Transformations in iron and steel]. Moscow: Nauka, 1977, 236 p. (In Russ.).
- Sourmail T., Smanio V. Low temperature kinetics of bainite formation in high carbon steels. *Acta Materialia*. 2013, vol. 61, no. 7, pp. 2639–2648.
- Borgenstam A., Hillert M., Agren J. Metallographic evidence of carbon diffusion in the growth of bainite. *Acta Materialia*. 2009, vol. 57, no. 11, pp. 3242–3252.
- Pridantsev M.V., Davydova L.N., Tamarina A.M. *Konstruktsionnye stali: Spravochnik* [Structural steels: Directory]. Moscow: Metallurgiya, 1980, 288 p. (In Russ.).
- Egerton R.F. *Physical Principles of Electron Microscopy. An Introduction to TEM, SEM, and AEM*. Berlin: Springer Science+Business Media, Inc, 2005, 211 p.
- Kumar C.S.S.R. *Transmission Electron Microscopy Characterization of Nanomaterials*. New York: Springer, 2014, 717 p.
- Barry Carter C., David B. *Transmission Electron Microscopy*. Berlin: Springer International Publishing, 2016, 518 p.
- Gol'dshteyn M.I., Farber B.M. *Dispersionnoe uprochnenie stali* [Dispersion hardening of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1979, 208 p. (In Russ.).
- Hirsch P.B., Howie A., Nicholson R.B., Pashley D.W., Whelan M.J. *Electron Microscopy of Thin Crystals*. Washington: Butterworth, 1965, 574 p.
- Chernyavskii K.S. *Stereologiya v metallovedenii* [Stereology in metal science]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 208 p. (In Russ.).
- Utevsii L.M. *Difraktsionnaya elektronnaya mikroskopiya v metallovedenii* [Diffraction electron microscopy in metal science]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 584 p. (In Russ.).
- Ivanov Yu.F., Kolubaeva Ya.A., Kornet E.V., Gromov V.E. Formation of the fine structure and phase composition of structural steel on quenching. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. 4, pp. 302–306.
- Ivanov Yu.F., Kornet E.V., Gromov V.E., Konovalov S.V. Structural-phase transformations in hardened structural steel under deformation. *Uspekhi fiziki metallov*. 2009, vol. 10, no. 4, pp. 391–416. (In Russ.).
- Gromov V.E., Nikitina E.N., Ivanov Yu.F. Evolution of carbide and defective subsystems of steel with bainitic structure under deformation. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2015, no. 3, pp. 74–80. (In Russ.).
- Gromov V.E., Nikitina E.N., Ivanov Yu.F., Aksenova K.V. Regularities of bainitic steel deformation transition. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, no. 012025.
- Naulor I.R. The influence of the lath morphology on the yield strength and transition temperature on martensite-bainite steel. *Met. Trans.* 1979, vol. 10A, no. 7, pp. 873–891.
- Belen'kii B.Z., Farber B.M., Gol'dshteyn M.I. Estimates of the strength of low-carbon low-alloy steels according to their structural data. *Fizika metallov i metallovedenie*. 1975, vol. 39, no. 3, pp. 403–409. (In Russ.).
- Trefilov V.I., Moiseev V.I., Pechkovskii E.P. etc. *Deformatsionnoe uprochnenie i razrushenie polikristallicheskih metallov* [Deformation consolidation and destruction of polycrystalline metals]. Kiev: Naukova dumka, 1987, 248 p. (In Russ.).
- McLean D. *Mechanical Properties of Metals*. John Wiley & Sons, London, 1962, 403 p. (Russ.ed.: McLean D. *Mekhanicheskie svoystva metallov*. Moscow: Metallurgiya, 1965, 431 p.).
- Koneva N.A., Kozlov E.V. Nature of sub-structural hardening. *Izvestiya VUZov. Fizika*. 1982, no. 8, pp. 3–14. (In Russ.).
- Koneva N.A., Kozlov E.V. Physics of sub-structural hardening. *Vestnik TGASU*. 1999, no. 1, pp. 21–35. (In Russ.).
- Kocks U.F. Statistical treatment of penetrable obstacles. *Canadian Journal of Phys.* 1967, vol. 45, no. 2, pp. 737–755.
- Strunin B.M. Probabilistic description of the field of internal stresses with random arrangement of dislocations. *Fizika tverdogo tela*. 1971, vol. 13, no. 3, pp. 923–926. (In Russ.).
- Mott N. F., Nabarro F. R. N. The distribution of dislocations in slip band. *Proc. Phys. Soc.* 1940, vol. 52, no. 1, pp. 86–93.
- Ashby M.F. *Physics of Strength and Plasticity*. MIT press Cambridge. Mass. 1969, 113 p.
- Tekin E., Kelly P.M. *Tempering of steel Precipitation from iron base alloys*. Gordon: Breach, 1965, 283 p.
- Norstrom L.A. On the yield strength of quenched low-alloy lath martensite. *Scandinavian J. of Met.* 1976, vol. 5, no. 4, pp. 159–165.
- Prnka T. Quantitative relations between parameters of disperse segregations and mechanical properties of steels. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka stali*. 1979, no. 7, pp. 3–8. (In Russ.).
- Kiseleva S.F., Popova N.A., Koneva N.A., Kozlov E.V. Influence of transformation microtwines on excessive density of dislocations and internal stresses of deformed FCC material. *Izv. RAN. Seriya fizicheskaya*. 2012, vol. 76, no. 13, pp. 70–74. (In Russ.).
- Orowan E. Conditions for dislocation passage of precipitates. In: *Proc. Symp. Intern. Stress in metals and alloys*. London: Inst. met., 1948, pp. 451–454.

**Acknowledgements.** The work was financially supported by the RFBR grant (no. 16-08-00385-a) and grant of the President of the Russian Federation for young scientists and graduate students, who carry out advanced research and development in the priority areas of modernization of the Russian economy (CII 1335.2016.1 project).

### Information about the authors:

**K.V. Aksenova**, Cand. Sci. (Eng.), Assistant of the Chair of Science named after V.M. Finkel (19krestik91@mail.ru)

**E.N. Nikitina**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Management and branch Economy" (nikitina\_en@mail.ru)

**Yu.F. Ivanov**, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Chief Researcher (yufi55@mail.ru)

**D.A. Kosinov**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of Department of Scientific Researches (kosinov.dima@rambler.ru)

Received December 12, 2017

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НИКЕЛЯ И ЖЕЛЕЗА ИЗ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО СИЛИКАТНОГО РАСПЛАВА В ПРОЦЕССЕ БАРБОТАЖА. СООБЩЕНИЕ 2. ВОССТАНОВИТЕЛЬ – СМЕСЬ $H_2 - H_2O^*$

*Вусихис А.С.<sup>1</sup>, к.т.н., старший научный сотрудник (vas58@mail.ru)*

*Леонтьев Л.И.<sup>2,3,4</sup>, д.т.н., академик, главный научный сотрудник (leo@imet.mplik.ru)*

*Кудинов Д.З.<sup>1</sup>, к.т.н., старший научный сотрудник (d.kudinov@mail.ru)*

*Селиванов Е.Н.<sup>1</sup>, д.т.н., заведующий лабораторией пирометаллургии  
цветных металлов (pcmlab@mail.ru)*

<sup>1</sup> Институт металлургии УрО РАН

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

<sup>2</sup> Президиум РАН

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

<sup>3</sup> Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

(119334, Россия, Москва, Ленинский проспект, 49)

<sup>4</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

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

**Аннотация.** В черной и цветной металлургии разработан ряд технологий, в основе которых лежат барботажные процессы. Для прогнозирования параметров плавки, включающей восстановление металлов из оксидного расплава газом-восстановителем в барботируемом слое в промышленных агрегатах, предложена методика термодинамического моделирования, в основе которой лежит расчет равновесия в системе оксидный расплав – металл – газ. Оригинальность методики состоит в том, что равновесие определяют для каждой единичной порции газа, вводимой в рабочее тело, при содержаниях оксидов восстанавливаемых металлов в каждом последующем расчетном цикле, равных равновесным в предыдущем. Для анализа взята оксидная система 1,8 % NiO – 17,4 % FeO – 13,5 % CaO – 1,9 % MgO – 58,0 % SiO<sub>2</sub> – 7,4 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, по содержанию компонентов близкая к составу окисленной никелевой руды. Соотношение H<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub> в газовой смеси варьировали в пределах 0 – 1,0. В зависимости от количества и состава газа, введенного в рабочее тело, оценивали содержание оксидов никеля и железа в расплаве (1823 К), определяли количество и состав образующегося металла (ферроникеля), а также показатели (кратность шлака, степени восстановления металлов), важные при реализации процесса в промышленных условиях. Увеличение расхода водорода монотонно снижает содержание оксида никеля в расплаве, в то время как содержание оксида железа первоначально возрастает, а затем – снижается. При введении H<sub>2</sub> в количестве около 50 м<sup>3</sup>/т расплава содержание оксида никеля в нем снижается до 0,017 %, а оксида железа до 16,7 %. Образующийся ферроникель содержит 61 % никеля, кратность шлака составляет 42 единицы. Дальнейшее увеличение расхода H<sub>2</sub> ведет к предпочтительному восстановлению железа. Повышение соотношения H<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub> ухудшает показатели восстановления металлов из расплава: уменьшается степень восстановления никеля и железа, увеличивается содержание никеля в сплаве и кратность шлака. Однако даже при соотношении H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O равном 1,0, что соответствует содержанию 50,0 % H<sub>2</sub>O в смеси газов, процесс восстановления не прекращается. Для сравнения в работе приведены данные по изменению содержания оксидов никеля и железа при восстановлении металлов из аналогичных расплавов монооксидом углерода. При степени восстановления никеля 98 % показатели близки в случае использования как H<sub>2</sub>, так и СО. Однако для их достижения водорода требуется в 2,5 раза, а смеси, в которой H<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub> = 0,11 (90 % H<sub>2</sub>), – в 1,36 раз меньше, чем монооксида углерода.

**Ключевые слова:** методика, термодинамическое моделирование, кинетика, восстановительный газ, барботаж, многокомпонентный оксидный расплав, водород.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-794-799

В черной и цветной металлургии разработан ряд технологий, в основе которых лежат барботажные процессы, Ромелт, Ванюкова, Hismelt, Ausmelt, Isasmelt [1 – 7] и их модификации [8 – 14]. Отличия последних технологий заключаются в том, что процессы плавления шихты и восстановления металлов из оксидного расплава разделены во времени и пространстве.

\* Работа выполнена в рамках государственного задания ИМЕТ УрО РАН по теме № 0396-2015-0082.

Для прогнозирования параметров плавки, включающей восстановление металлов из оксидного расплава газом-восстановителем в барботируемом слое в промышленных агрегатах, ранее предложена методика теоретических расчетов с применением методов термодинамического моделирования (ТДМ) [15]. Методологию ТДМ используют для решения различных теоретических и прикладных задач [16], в частности, совершенствования технологий [17 – 20] в металлургии.

В работах [21 – 23] указанная методика была применена для оценки влияния температуры на восстановление никеля, железа водородом из оксидных расплавов систем  $B_2O_3-CaO-NiO$ ,  $B_2O_3-CaO-FeO$ ,  $B_2O_3-CaO-FeO-NiO$ . В работе [24] приведены результаты моделирования процесса совместного восстановления никеля и железа в системе, близкой по составу к магнезиальным никелевым рудам, смесью  $CO-CO_2$ .

В настоящей работе приведены результаты термодинамического моделирования процесса восстановления никеля и железа из силикатного расплава с использованием смесей  $H_2-H_2O$ .

Термодинамическое моделирование проведено в условиях, аналогичных представленным в работе [24]: температура 1823 К, давление 0,1 МПа, соотношения  $H_2O/H_2$  в пределах от 0 до 1,0 (в приведенных данных и на рисунках номера кривых совпадают). Состав газов приведен ниже:

Образец газа	Содержание, % (объем.)		
	$H_2$	$H_2O$	$H_2O/H_2$
1	100	0	0
2	90	10	0,11
3	80	20	0,25
4	70	30	0,43
5	60	40	0,67
6	50	50	1,00

Количество газа в единичном цикле расчетов принято равным 1 моль, а компонентов исходного оксидного расплава: 1 моль  $NiO$ , 10 моль  $FeO$ , 40 моль  $SiO_2$ , 3 моль  $Al_2O_3$ , 10 моль  $CaO$ , 2 моль  $MgO$ .

Термодинамические расчеты позволили выявить следующие зависимости:

- содержания оксидов никеля ( $C_{NiO}$ ) и железа ( $C_{FeO}$ ) в силикатном расплаве от общего расхода газа ( $M_r$ , моль), определяемого как произведение количества газа в единичной порции ( $m_r$ , моль) на количество расчетных циклов ( $k$ );

- количества никеля ( $n_{Ni}$ , моль) и железа ( $n_{Fe}$ , моль), восстановленных одной порцией газа, от номера расчетного цикла ( $Z$ );

- степени восстановления никеля ( $\varphi_{Ni}$ ) и железа ( $\varphi_{Fe}$ ) как отношения количеств элементов в металлическом состоянии к их общему количеству в системе  $\left( \varphi_{Me} = \frac{n_{Me}}{n_{Me} + n_{MeO}} \cdot 100 \% \right)$  от общего расхода газа;

- кратности шлака – отношение массы оксидного расплава ( $m_{ш}$ ) к массе металла ( $m_{Me}$ ) от общего расхода газа;

- содержания никеля в сплаве ( $C_{Ni}$ , % (по массе)) от общего расхода газа;

- содержания  $H_2$  в единичной порции (% (объем.)) от номера расчетного цикла.

Анализ полученных данных показывает, что в ходе восстановления содержание оксида никеля в распла-

ве монотонно уменьшается, а степень восстановления увеличивается независимо от доли водорода в исходном газе. При равных расходах газа чем меньше в нем содержание водорода, тем выше значение  $C_{NiO}$  в расплаве и ниже степень восстановления (рис. 1). Если водорода в газе более 90 %, то оксид никеля восстанавливается практически полностью ( $\varphi_{Ni} = 99 \%$ ), а при содержании водорода 50 % – степень восстановления не превышает 28 %. В последнем случае содержание оксида никеля в расплаве близко к 1,3 %.

Содержание оксида железа в расплаве первоначально возрастает, проходит через максимум, а затем снижается (рис. 2).

Это объясняется большей скоростью и полнотой восстановления никеля по сравнению с железом по реакции:



Равновесный состав оксидного расплава, газа и металла определяется константами равновесия реакции ( $K_p$ ). Поскольку  $K_{pNi} \gg K_{pFe}$ , то, несмотря на большее содержание в исходном силикатном расплаве оксида железа  $FeO$  в сравнении с содержанием оксида никеля

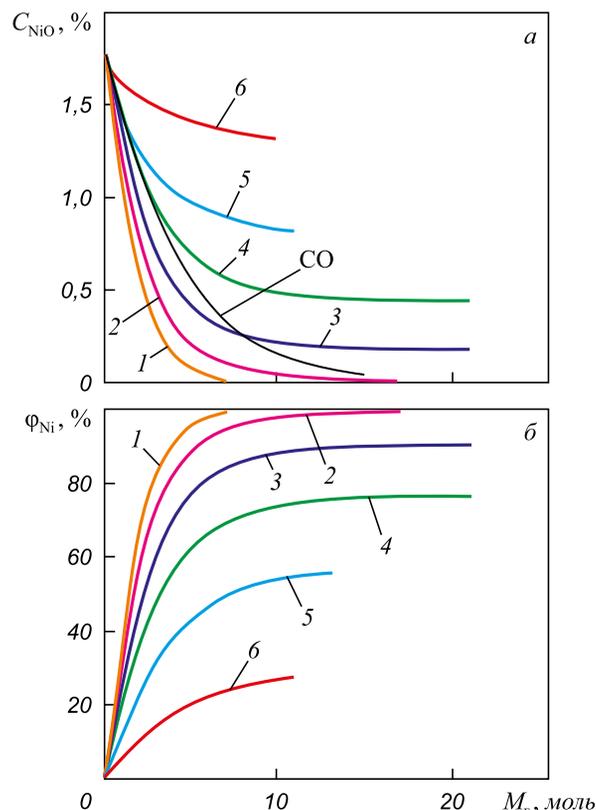


Рис. 1. Изменение содержания оксида никеля в расплаве (а) и степени его восстановления (б) от общего расхода газа (значения для  $CO$  приведены по данным работы [24])

Fig. 1. Change of nickel oxide content in the melt (a) and its reduction degree (b) with increase of total gas consumption (values for  $CO$  – according to the data [14])

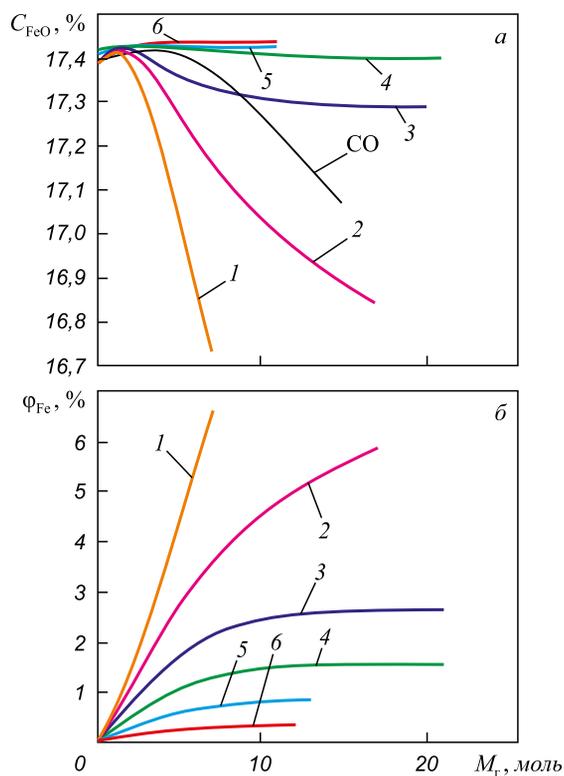


Рис. 2. Изменение содержания оксида железа (а) и степени его восстановления (б) от общего расхода газа

Fig. 2. Change of iron oxide content in the melt (a) and its reduction degree (b) with increase of total gas consumption

$NiO$ , количество никеля ( $n_{Ni}$ )<sub>1</sub>, восстановленного в первом цикле единичной порцией газа, на порядок выше этих значений для железа ( $n_{Fe}$ )<sub>1</sub>. В результате содержание оксида никеля в расплаве уменьшается, а оксида железа – незначительно возрастает. В дальнейшем с ростом расхода газа значения  $n_{Ni}$  монотонно уменьшаются, а  $n_{Fe}$  проходят через максимум. Соответственно, значения  $C_{NiO}$  меняются монотонно, а  $C_{FeO}$  – проходят через максимум.

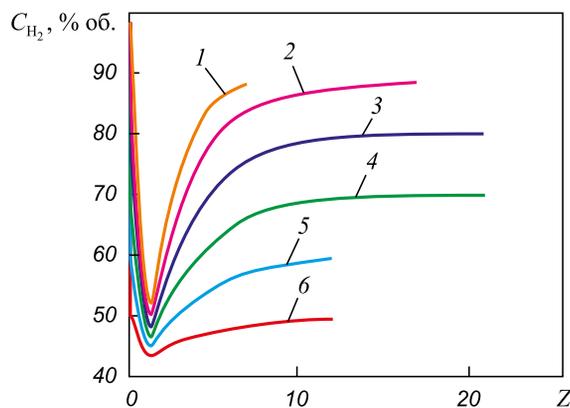


Рис. 3. Изменение содержания  $H_2$  в единичной порции газа в зависимости от номера расчетного цикла

Fig. 3. Change of  $H_2$  content in a single gas portion with increase of the cycle number

Общее количество металла, восстановленного единичной порцией газа, в первом цикле имеет максимальное значение, а по мере развития процесса – уменьшается. Поэтому первоначально в отходящем газе доля водорода  $H_2$  минимальна, в дальнейшем – увеличивается и приближается к пределу (рис. 3).

Содержание никеля в образующемся металлическом сплаве монотонно уменьшается по мере роста  $M_T$  (рис. 4). Это связано с первоначальным развитием процесса восстановления никеля и превалированием значений  $n_{Ni}$  над  $n_{Fe}$ . Однако после снижения  $C_{NiO}$  и практически полного перехода никеля в металл, процессы восстановления железа продолжают, что влияет на величины  $C_{FeO}$ . В приведенных расчетах при значении  $\varphi_{Ni}$ , близком к 99 %, величина  $\varphi_{Fe}$  не превышает 6,0 % (рис. 1, 2).

По мере уменьшения  $C_{NiO}$  доля водорода, расходуемого на взаимодействие с оксидом железа, увеличивается. При этом кратность шлака составляет не менее 60 единиц (рис. 4). Это означает, что доля металла в системе по завершению восстановления не превышает 2 %. Лишь после полного восстановления никеля развивается восстановление железа, что сопровождается увеличением его доли в сплаве.

Варьирование соотношения  $H_2O/H_2$  в исходной смеси влияет на содержание оксида никеля в силикатном

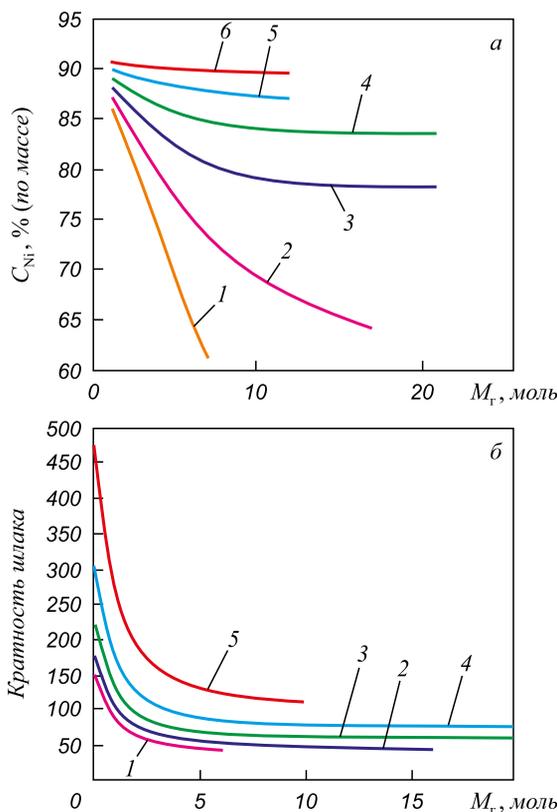


Рис. 4. Изменение содержания никеля в сплаве (а) и кратности шлака (б) от общего расхода газа

Fig. 4. Change of nickel content in the alloy (a) and of relation between slag and metal (b) with increase of total gas consumption

расплаве даже при равных количествах введенного в систему газа. Так, содержание никеля в сплаве, кратность шлака увеличиваются, а доля  $H_2$  в отходящем газе, степени восстановления железа и никеля, количества никеля и железа, восстановленных одной порцией газа, уменьшаются. По мере увеличения общего расхода газа величины указанных параметров приближаются к предельным значениям, соответствующим равновесию с исходной смесью.

Параметры системы, соответствующие последнему циклу расчетов ( $Z_{max}$ ) при различных значениях доли  $H_2O$  в исходной газовой смеси, представлены в таблице.

На рис. 1, 2 и в приведенных данных для сравнения показано изменение параметров восстановления металлов из аналогичных расплавов монооксидом углерода [24]. Параметры процесса восстановления приведены ниже:

Параметр	Значение параметра		
	CO	$H_2$	$H_2$
Газ			
$C_r$ , % (объем.)	100	100	90
$\varphi_{Ni}$ , %	97,80	98,09	98,10
$V$ , м <sup>3</sup> /т	102	41	75
$C_{NiO}$ , % (по массе)	0,050	0,035	0,035
$C_{FeO}$ , % (по массе)	17,06	16,9	17,00
$C_b^*$ , %	96,30	87,05	87,12
$C_{vo}^*$ , %	3,70	12,95	12,88
Кратность шлака	41	42	47
$C_{Ni}$ , %	70,3	65,0	68,3
$\varphi_{Fe}$ , %	4,4	5,6	4,8

При степени восстановления никеля около 98 % остальные показатели так же близки, однако для их достижения водорода требуется в 2,5 раза, а смеси, в которой  $H_2O/H_2 = 0,11$  ( $H_2 - 90\%$ ), в 1,36 раз меньше, чем оксида углерода CO.

**Выводы.** Показатели восстановления никеля и железа из силикатного расплава определяются как содержанием оксидов металлов в расплаве, так и составом газа-восстановителя. При использовании чистого водорода никель восстанавливается практически на 100 %, а степень восстановления железа можно регулировать путем варьирования общего расхода газа. Небольшое (до 10 %) количество  $H_2O$  в газовой смеси мало влияет на показатели восстановления никеля и железа из оксидного расплава. Однако дальнейшее уменьшение доли водорода в газе ведет к деградации восстановительных процессов. Восстановление никеля и железа водородом эффективнее, чем оксидом углерода CO.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Роменец В.А., Валавин В.С., Усачев А.Б. Процесс Ромелт / Под общ. ред. В.А. Роменца. – М.: Руда и металлы, 2005. – 399 с.
2. Ванюков А.В., Быстров В.П., Васкевич А.Д. Плавка в жидкой ванне / Под ред. А.В. Ванюкова. – М.: Metallurgia, 1986. – 259 с.
3. Автогенные процессы в цветной металлургии / В.В. Мечев, В.П. Быстров, А.В. Тарасов и др. – М.: Metallurgia, 1991. – 413 с.
4. Extractive Metallurgy of Copper / Mark E. Schlesinger, Matthew J. King, Kathryn C. Sole, William G. Davenport. – Elsevier, Fifth Edition, 2011. – 481 p.
5. Vignes A. Extractive Metallurgy 3: Processing Operations and Routes ISTE Ltd. – John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 352 p.
6. Bakker M.L., Nikolic S., Mackey P.J. ISASMELT TSL – Applications for nickel // Mineral Eng. (An International Journal

**Параметры, соответствующие завершающему циклу расчетов ( $Z_{max}$ ) при различных долях  $H_2O$  в исходной газовой смеси (1823 К)**

**Parameters corresponding to the final calculation cycle ( $Z_{max}$ ) for various proportion of  $H_2O$  in the initial gas mixture (1823 K)**

Параметр	Значение параметра					
	0	0,11	0,25	0,43	0,67	1,00
$H_2O/H_2$	0	0,11	0,25	0,43	0,67	1,00
$H_2O$ , %	0	10	20	30	40	50
$Z_{max}$	7	17	21	21	11	10
$V$ , м <sup>3</sup> /т	48	115	205	205	75	68
$M_r$ , моль	7	17	21	21	11	10
$C_{NiO}$ , % (по массе)	0,0170	0,0013	0,0180	0,4400	0,8170	1,3200
$C_{FeO}$ , % (по массе)	16,72	16,84	17,29	17,4	17,44	17,43
$H_2^*$ , %	88,3	88,4	80,0	70,0	59,0	49,3
$H_2O^*$ , %	11,70	11,6	20,00	30,00	41,00	50,70
Кратность шлака	42,00	44,00	59,65	75,90	110,00	225,00
$C_{Ni}$ , %	61,08	64,0	78,26	83,59	87,12	89,55
$\varphi_{Ni}$ , %	99,10	99,30	90,15	76,02	55,38	28,23
$\varphi_{Fe}$ , %	6,65	5,88	2,64	1,57	0,86	0,35

- Devoted to Innovation and Developments in Mineral Processing and Extractive Metallurgy). 2011. Vol. 24. No. 7. P. 610 – 619.
7. Bakker M.L., Nikolic S., Burrows A.S. ISACONVERT TM – continuous converting of nickel/PGM mattes // Alvear G.R.F.J.S.Afr. Inst. Mining and Met. 2011. Vol. 111. No. 10. P. 285 – 294.
  8. Ковган П.А., Волков В.А., Козырев В.В. и др. Экологически чистая технология бескоксовой плавки окисленных никелевых руд // Цветная металлургия. 1994. № 11-12. С. 16 – 17.
  9. Лазарев В.И., Лазарев В.И., Спесивцев А.В., Быстров В.П. Развитие плавки Ванюкова с обеднением шлаков // Цветные металлы. 2000. № 6. С. 33 – 36.
  10. Ковган П.А., Абуов М.Г., Едильбаев А.И. Перспективные технологии переработки бедных окисленных никелевых руд // Цветные металлы. 2008. № 2. С. 43 – 45.
  11. Цымбулов Л.Б., Князев М.В., Цемехман Л.Ш., Кудабаяев Е.А., Головлев Ю.И. Анализ различных вариантов технологической схемы переработки окисленных никелевых руд на ферроникель с применением двухзонной печи Ванюкова // Цветные металлы. 2010. № 10. С. 15 – 21.
  12. Быстров В.П., Федоров А.Н., Щелкунов В.В., Быстров С.В. Использование процесса Ванюкова для переработки окисленных никелевых руд // Цветные металлы. 2011. № 8-9. С. 155 – 158.
  13. Роменец В.А., Валавин В.С., Похвиснев Ю.В. Технологическая оценка реализации процесса Ромелт в классическом и двухзонном вариантах // Металлург. 2014. № 1. С. 45 – 50.
  14. Досмухамедов Н.К., Жолдасбай Е.Е., Нурлан Г.Б., Сейткулова Ж.Б. Исследование поведения цветных металлов, железа и мышьяка при восстановительном обеднении богатых по меди шлаков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 1 (часть 4). С. 486 – 491.
  15. Вусихис А.С., Дмитриев А.Н. Исследование процессов восстановления оксидов металлов из расплава газом-восстановителем в барботируемом слое // Вестник УГТУ-УПИ. 2004. № 15 (45). Ч. 1. С. 93 – 95.
  16. Моисеев Г.К., Вяткин Г.П. Термодинамическое моделирование в неорганических системах: Учебное пособие. – Челябинск: изд. ЮУрГУ, 1999. – 256 с.
  17. Sohn H.Y. Process Modeling in Non-Ferrous Metallurgy. – In book: Treatise on Process Metallurgy: Industrial Processes. Ed. by S. Seetharaman. Chapter 2.4. – Oxford: Elsevier Ltd., 2014. P. 701 – 838.
  18. Pickles C.A., Harris C.T., Peacey J., Forster J. Thermodynamic analysis of the Fe-Ni-Co-Mg-Si-O-H-S-C-Cl system for selective sulphidation of a nickeliferous limonitic laterite ore // Miner. Eng. An International Journal Devoted to Innovation and Developments in Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 2013. Vol. 54. P. 52 – 62.
  19. Комков А.А., Ладыго Е.А., Быстров В.П. Термодинамический анализ процесса восстановительного обеднения шлаков, богатых по меди и никелю // Изв. вуз. Цветная металлургия. 2002. № 4. С. 7 – 14.
  20. Pickles C.A. Thermodynamic analysis of the selective carbothermic reduction of electric arc furnace dust // Journal of Hazardous Materials. 2008. Vol. 150. P. 265 – 278.
  21. Вусихис А.С., Кудинов Д.З., Леонтьев Л.И. Моделирование кинетики восстановления никеля из многокомпонентного оксидного расплава водородом в барботируемом слое // ЖФХ. 2008. Т. 82. № 11. С. 2035 – 2038.
  22. Dmitriev A.N., Vusikhis A.S., Sitnikov V.A., etc. Thermodynamic modeling of iron oxide reduction by hydrogen from the B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-FeO melt in bubbled layer. // Israel Journal of Chemistry. 2007. Vol. 47. No. 3-4. P. 299 – 302.
  23. Вусихис А.С., Кудинов Д.З., Леонтьев Л.И. Моделирование кинетики совместного восстановления железа и никеля из многокомпонентного оксидного расплава водородом в барботируемом слое // ЖФХ. 2008. Т. 82. № 11. С. 2030 – 2034.
  24. Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Кудинов Д.З., Селиванов Е.Н. Особенности восстановления никеля и железа из многокомпонентного силикатного расплава в процессе барботажа. Сообщение 1. Восстановитель – смесь CO – CO<sub>2</sub> // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 9. С. 731 – 736.

Поступила 11 июля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 10, pp. 794–799.

## THERMODYNAMIC MODELING OF NICKEL AND IRON REDUCTION FROM MULTICOMPONENT SILICATE MELT IN BUBBLING PROCESS. REPORT 2. REDUCING AGENT – A MIXTURE OF H<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>O

*A.S. Vusikhis<sup>1</sup>, L.I. Leont'ev<sup>2,3,4</sup>, D.Z. Kudinov<sup>1</sup>, E.N. Selivanov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Institute of Metallurgy UB RAS, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Scientific Council on Metallurgy and Metal Science of Russian Academy of Sciences (Department of Chemistry and Material Sciences), Moscow, Russia

<sup>3</sup>Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Moscow, Russia

<sup>4</sup>National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

**Abstract.** A number of technologies in ferrous and non-ferrous metallurgy are based on bubbling processes. For prediction of melting parameters including the reduction of metals from oxide melt by a reducing gas in a bubbling layer in industrial aggregates, a thermodynamic modeling technique is proposed based on calculation of the equilibrium in oxide-melt-metal-gas system. Originality of the technique is that equilibrium is determined for each unit dose of gas introduced into the working body, with the contents of oxides of metals being reduced in each subsequent design cycle equal to the equilibrium in the previous one. For the analysis NiO (1.8 %) – FeO (17.4 %) – CaO (13.5 %) –

– MgO (1.9 %) – SiO<sub>2</sub> (58.0 %) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (7.4 %) oxide system was taken, closely corresponding to composition of oxidized nickel ore. The ratio of H<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub> in gas mixture varies between 0 and 1.0. (1823 K), amount and composition of formed metal (ferronickel), as well as the indices (the ratio of slag and metal, the degree of reduction of metals) are important in implementation of the process under commodity conditions. The increase in hydrogen consumption monotonously reduces the content of nickel oxide in the melt, while the content of iron oxide initially increases, and then decreases. When H<sub>2</sub> is introduced in an amount of about 50 m<sup>3</sup> per ton of the melt, the content of nickel oxide in it is reduced to 0.017 %, and of iron oxide to 16.7 %. Resulting ferronickel contains 61 % Ni, ratio of slag and metal – 42 units. Further increase in H<sub>2</sub> consumption leads to preferential iron reduction. An increase in H<sub>2</sub>O/H<sub>2</sub> ratio worsens the results of reduction of metals from the melt: decrease in degree of reduction of nickel and iron, increase in nickel content in the alloy, and the ratio of slag and metal. However, even with a H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O ratio of 1.0, which corresponds to 50 % of H<sub>2</sub>O in the gas mixture, reduction process does not stop. For comparison, the work presents data on change in content of nickel and iron oxides, when metals are restored from similar melts with carbon monoxide. At a nickel recovery rate of 98 %, indicators are close in case of using both H<sub>2</sub> and CO. However, to achieve them, it is required 2.5 times

less hydrogen, and 1.36 times less mixture in which  $H_2O/H_2 = 0.11$  ( $H_2 - 90\%$ ) than carbon monoxide.

**Keywords:** technique, thermodynamic modeling, kinetics, reducing gases, bubbling processing, multicomponent oxide melts, hydrogen.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-10-794-799

## REFERENCES

- Romenets V.A., Valavin V.S., Usachev A.B. *Protsess Romelt* [Romelt Process]. Romenets V.A. ed. Moscow: Ruda i metall, 2005, 399 p. (In Russ.).
- Vanyukov A.V., Bystrov V.P., Vaskevich A.D. *Plavka v zhidkoi vanne* [Melting in a liquid bath]. Vanyukov A.V. ed. Moscow: Metallurgiya, 1986, 259 p. (In Russ.).
- Mechev V.V., Bystrov V.P., Tarasov A.V. etc. *Avtogennyye protsessy v tsvetnoi metallurgii* [Autogenous processes in non-ferrous metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 413 p. (In Russ.).
- Mark E. Schlesinger, Matthew J. King, Kathryn C. Sole, William G. Davenport. *Extractive Metallurgy of Copper*. Elsevier, 2011, 481 p.
- Vignes A. *Extractive Metallurgy 3: Processing Operations and Routes* ISTE Ltd. John Wiley & Sons, Inc., 2011, 352 p.
- Bakker M.L., Nikolic S., Mackey P.J. ISASMELT™ TSL – Applications for nickel. *Mineral Eng. (An International Journal Devoted to Innovation and Developments in Mineral Processing and Extractive Metallurgy)*. 2011, vol. 24, no. 7, pp. 610–619.
- Bakker M.L., Nikolic S., Burrows A.S. ISACONVERT™ – continuous converting of nickel/PGM mattes. *Alvear G.R.F.J.S.Afr. Inst. Mining and Met.* 2011, vol. 111, no. 10, pp. 285–294.
- Kovgan P.A., Volkov V.A., Kozyrev V.V. etc. Environmentally friendly technology of non-coke melting of oxidized nickel ores. *Tsvetnaya metallurgiya*. 1994, no. 11-12, pp. 16–17. (In Russ.).
- Lazarev V.I., Lazarev V.I., Spesivtsev A.V., Bystrov V.P. Development of Vanyukov smelting with depletion of slag. *Tsvetnye metall.* 2000, no. 6, pp. 33–36. (In Russ.).
- Kovgan P.A., Abuov M.G., Edil'baev A.I. Perspective technologies of processing of poor oxidized nickel ores. *Tsvetnye metall.* 2008, no. 2, pp. 43–45. (In Russ.).
- Tsymbolov L.B., Knyazev M.V., Tsemekhman L.Sh., Kudabaev E.A., Golovlev Yu.I. Analysis of various variants of the technological scheme of processing of oxidized nickel ore into ferronickel with the use of two-zone Vanyukov furnace. *Tsvetnye metall.* 2010, no. 10, pp. 15–21. (In Russ.).
- Bystrov V.P., Fedorov A.N., Shchelkunov V.V., Bystrov S.V. Use of Vanyukov process for the processing of oxidized nickel ores. *Tsvetnye metall.* 2011, no. 8-9, pp. 155–158. (In Russ.).
- Romenets V.A., Valavin V.S., Pokhvisnev Yu.V. Technological assessment of the Romelt process in the classic and two-zone variants. *Metallurgist*. 2014, vol. 58, no. 1-2, pp. 20–27.
- Dosmukhamedov N.K., Zholdasbai E.E., Nurlan G.B., Seitkulova Zh.B. Study of the behavior of non-ferrous metals, iron and arsenic in reducing depletion of copper-rich slag. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*. 2016, no. 1 (p. 4), pp. 486–491. (In Russ.).
- Vusikhis A.S., Dmitriev A.N. Investigation of the processes of reduction of metal oxides from the melt by reducing gas in the bubbled layer. *Vestnik UGTU-UPI*. 2004, no. 15 (45), Part 1, pp. 93–95. (In Russ.).
- Moiseev G.K., Vyatkin G.P. *Termodinamicheskoe modelirovanie v neorganicheskikh sistemakh: Uchebnoe posobie* [Thermodynamic modeling in inorganic systems]. Chelyabinsk: YuUrGU, 1999, 256 p. (In Russ.).
- Sohn H.Y. Process modeling in non-ferrous metallurgy. In: *Treatise on Process Metallurgy: Industrial Processes*. Ed. by S. Seetharaman. Chapter 2.4. Oxford: Elsevier Ltd., 2014, pp. 701–838.
- Pickles C.A., Harris C.T., Peacey J., Forster J. Thermodynamic analysis of the Fe-Ni-Co-Mg-Si-O-H-S-C-Cl system for selective sulphidation of a nickeliferous limonitic laterite ore. *Miner. Eng. An International Journal Devoted to Innovation and Developments in Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2013, vol. 54, pp. 52–62.
- Komkov A.A., Ladygo E.A., Bystrov V.P. Thermodynamic analysis of reducing depletion of slags rich in copper and nickel. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Tsvetnaya Metallurgiya*. 2002, no. 4, pp. 7–14. (In Russ.).
- Pickles C.A. Thermodynamic analysis of the selective carbothermic reduction of electric arc furnace dust. *Journal of Hazardous Materials*. 2008, vol. 150, pp. 265–278.
- Vusikhis A.S., Kudinov D.Z., Leont'ev L.I. Modeling of the kinetics of reduction of nickel from multicomponent oxide melt with hydrogen in barotrauma layer. *Journal of physical chemistry*. 2008, vol. 82, no. 11, pp. 2035–2038.
- Dmitriev A.N., Vusikhis A.S., Sitnikov V.A., etc. Thermodynamic modeling of iron oxide reduction by hydrogen from the  $B_2O_3$ -CaO-FeO melt in bubbled layer. *Israel Journal of Chemistry*. 2007, vol. 47, no. 3-4, pp. 299–302.
- Vusikhis A.S., Kudinov D.Z., Leont'ev L.I. Modeling of kinetics of joint reduction of iron and nickel from multicomponent oxide melt by hydrogen in the bubbled layer. *Journal of physical chemistry*. 2008, vol. 82, no. 11, pp. 2030–2034.
- Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Kudinov D.Z., Selivanov E.N. Thermodynamic modeling of nickel and iron reduction from multicomponent silicate melt in bubbling process. Report 1. Reducing agent – a mixture of CO – CO<sub>2</sub>. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 9, pp. 731–736. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was performed within the framework of the state task of the IMET UrB RAS on the topic no. 0396-2015-0082.

### Information about the authors:

**A.S. Vusikhis**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher  
(vas58@mail.ru)

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

**D.Z. Kudinov**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher  
(d.kudinov@mail.ru)

**E.N. Selivanov**, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Pyrometallurgy of Nonferrous Metals (pcmlab@mail.ru)

Received July 11, 2017

УДК 546.271:661.875

**СИНТЕЗ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО ДИБОРИДА ХРОМА  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОВОЛОКНИСТОГО УГЛЕРОДА\*****Крутский Ю.Л.<sup>1</sup>**, к.т.н., доцент кафедры химии и химической  
технологии (j\_krutskii@rambler.ru)**Дюкова К.Д.<sup>2</sup>**, инженер аналитической лаборатории (dyukova\_kx701@mail.ru)**Кузьмин Р.И.<sup>1</sup>**, аспирант кафедры материаловедения  
в машиностроении (kuzmin.2010@corp.nstu.ru)**Нецкина О.В.<sup>3,4</sup>**, к.х.н., старший научный сотрудник лаборатории исследования  
гидридных соединений (netskina@catalysis.ru)**Иорх А.Е.<sup>1</sup>**, бакалавр кафедры материаловедения в машиностроении (fronghlight@mail.ru)<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет  
(630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20)<sup>2</sup> ООО «Международный научный центр по теплофизике и энергетике»  
(630090, Россия, Новосибирск, ул. Кутателадзе, 7/11)<sup>3</sup> Институт катализа им. А.В. Борескова СО РАН  
(630090, Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 3)<sup>4</sup> Новосибирский государственный университет  
(630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2)

**Аннотация.** Представлены результаты исследования процесса синтеза высокодисперсного порошка диборида хрома. Диборид хрома был получен восстановлением оксида хрома  $Cr_2O_3$  нановолокнистым углеродом (НВУ) и карбидом бора в индукционной печи в среде аргона. НВУ – продукт каталитического разложения легких углеводородов. Основной характеристикой НВУ является высокое значение площади удельной поверхности (~150 000 м<sup>2</sup>/кг), что существенно выше, чем у сажи (~50 000 м<sup>2</sup>/кг). Содержание примесей в НВУ находится на уровне 1 % (по массе). Использованный в качестве реагента карбид бора характеризовался высокой дисперсностью (на уровне ~2 мкм) и незначительным содержанием примесей – не более 1,5 % (по массе). На основе анализа диаграммы состояния системы Cr–B определены состав шихты и верхний температурный предел реакции боридообразования для получения диборида хрома  $CrB_2$  в порошкообразном состоянии. На основе термодинамического анализа определена температура начала реакции восстановления оксида хрома  $Cr_2O_3$  углеродом и карбидом бора при различных давлениях CO. Состав и характеристики диборида хрома изучены с использованием рентгенофазового анализа, метода атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП), сканирующей электронной микроскопии с применением локального энергодисперсионного рентгеновского микроанализа (EDX), низкотемпературной адсорбции азота с последующим определением удельной поверхности по методу БЭТ, седиментационного анализа, синхронной термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии (ТГ/ДСК). Полученный при оптимальных параметрах материал представлен одной фазой – диборидом хрома  $CrB_2$ . Содержание примесей в дибориде хрома не превышает 2,5 % (по массе). Частицы порошка преимущественно агрегированы. Средний размер частиц и агрегатов составляет 7,95 мкм с широким диапазоном распределения по размерам. Площадь удельной поверхности однофазного образца составляет 3600 м<sup>2</sup>/кг. Окисление диборида хрома начинается при температуре 430 °С и при достижении температуры 1000 °С степень окисления составляет примерно 25 %. Оптимальными параметрами синтеза являются соотношение реагентов по стехиометрии на получение диборида хрома при температуре 1700 °С и времени выдержки 20 мин. Показано, что для такого процесса нановолокнистый углерод является эффективным реагентом и что оксид хрома  $Cr_2O_3$  практически полностью восстанавливается до диборида хрома.

**Ключевые слова:** высокодисперсный порошок, синтез, диборид хрома, нановолокнистый углерод, карбид бора, восстановление, индукционный нагрев.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-800-806

**ВВЕДЕНИЕ**

Диборид хрома  $CrB_2$  характеризуется тугоплавкостью, химической инертностью, высокими значениями

твердости и теплопроводности [1]. Он используется в виде компонентов наплавочных порошковых смесей, стойких к абразивному износу [2], при нанесении износостойких покрытий на изделия из нержавеющей стали и на твердосплавный инструмент [3, 4], изготовлении высококачественной керамики [5].

Синтез диборида хрома из элементов был реализован при механоактивации шихты с последующей ее термической обработкой при 1000 °С в вакууме. Полученный

\* Работа выполнена в Новосибирском государственном техническом университете при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках реализации комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства (договор № 02.G25.31.0144 от 01.12.2015 г).

продукт, помимо целевого соединения, содержал низшие боридные фазы ( $\text{CrB}$ ,  $\text{Cr}_2\text{B}_3$ ) [6]. Боротермический метод получения этого соединения был описан ранее [7]. Особенностью боротермических процессов является повышенный (сверх стехиометрического) расход бора. Карботермический синтез был изучен в работе [8]. Исходными реагентами служили оксид хрома, борная кислота и сажа. Смесь предварительно перемешивалась в шаровой мельнице в течение 6 ч. Процесс синтеза проводился в среде водорода. Оптимальными параметрами синтеза являются температура  $1700\text{ }^\circ\text{C}$ , сравнительно длительное время (2,5 ч). При металлотермическом методе восстановителем может служить магний [9]. Характерной особенностью металлотермических процессов является необходимость очистки целевых продуктов от соединений металлов-восстановителей (в данном случае оксида  $\text{MgO}$ ). Карбидоборный процесс был описан в работе [10]. В качестве источника углерода использовалась ламповая сажа с удельной поверхностью  $50\ 000\ \text{м}^2/\text{кг}$ . Поскольку химический состав промышленного карбида бора вследствие наличия в нем значительного количества примесей отличается от теоретического для  $\text{V}_4\text{C}$  [11], то при расчете состава шихты проводили соответствующий пересчет количества сажи, добавляемой в шихту. Оптимальные параметры процесса синтеза диборида хрома следующие: температура  $1800\text{ }^\circ\text{C}$ , время синтеза 60 мин, защитная атмосфера из водорода. Размер частиц полученного диборида хрома не приводится. Синтез диборида хрома этим процессом также описан в работе [12]. Для экспериментов применялся порошок карбида бора с содержанием примесей примерно 2 % (по массе) со средним размером частиц 5,34 мкм, а также порошок нефтяного кокса со средним размером частиц 13,9 мкм. Эксперименты проводились в индукционной печи в условиях глубокого вакуума ( $10^{-5}\ \text{бар} \approx 1\ \text{Па}$ ). Время выдержки во всех случаях составляло 2 ч. Однофазный продукт, содержащий только диборид хрома, получен при температуре  $1700\text{ }^\circ\text{C}$ . Полученный образец затем измельчали в мельнице до размеров 4 – 5 мкм. Синтез ультратонкого порошка диборида хрома осуществлен при восстановлении оксида хрома пропан-бутаном в присутствии бора в потоке азото-водородной плазмы [13]. Средний размер частиц 41 нм, содержание основного вещества 90,05 – 93,55 % (по массе).

Высказывается мнение [14], что карбидоборный метод наиболее перспективен для организации крупномасштабного производства диборидов переходных металлов, в том числе и диборида хрома. Однако следует отметить, что сведения о влиянии вида углеродного материала, а также чистоты и дисперсности карбида бора на параметры синтеза карбидоборным методом диборида хрома и, в особенности, на его характеристики в литературе ограничены. В частности, практически полностью отсутствует информация об использовании в качестве реагентов нановолокнистого углерода

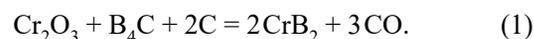
(НВУ), полученного при каталитическом пиролизе легких углеводородов [15] и высокодисперсного карбида бора с незначительным содержанием примесей [16]. В то же время установлено, что они являются эффективными реагентами для синтеза высокодисперсного порошка диборида титана [17].

Целью настоящей работы являлось исследование влияния температуры на процесс синтеза диборида хрома карбидоборным методом с использованием в качестве реагентов НВУ и высокодисперсного карбида бора и изучение характеристик и свойств продуктов реакции.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Нановолокнистый углерод состоит из гранул размером 4 – 8 мм, образованных плотно переплетенными нанонитями диам. 30 – 100 нм. НВУ достаточно чист: находящиеся в нем примеси представляют собой остатки исходного катализатора (90 %  $\text{Ni}$ /10 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); их содержание не превышает 1 % (по массе) [15]. Для проведения синтеза гранулы НВУ растирались в агатовой ступке и просеивались через сито 100 мкм. Удельная поверхность измельченного НВУ находится на уровне  $150\ 000\ \text{м}^2/\text{кг}$ , т.е. существенно выше, чем у ламповой сажи (примерно  $50\ 000\ \text{м}^2/\text{кг}$ ) [10, 15]. На снимках просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ПЭМВР), полученных на микроскопе JEM-2010 (JEOL), отчетливо видно, что при сопоставимых размерах поверхность частиц НВУ по сравнению с сажой развита значительно более сильно (рис. 1). Другими реагентами были оксид хрома (ГОСТ 2912 – 79, сорт ОХП-1, примерно 99 % чистоты, средний размер 50 % (по массе) частиц  $D_{50} = 1,59\ \text{мкм}$ ) и карбид бора со средним размером частиц 2,1 мкм и содержанием примесей около 1,5 % (по массе) [16]. Все они перед использованием выдерживались в печи при  $100\text{ }^\circ\text{C}$  для удаления влаги.

Известно, что диборид хрома имеет очень узкую область гомогенности (66 – 70 ат. % В) [1, 18], поэтому для его получения без примесей исходных реагентов шихта готовилась строго по стехиометрии для реакции:



На практике даже при незначительной неоднородности шихты (например, во время расслаивания при длительном хранении или вибрации) в системе  $\text{Cr}-\text{B}$  возможно появление жидкой фазы уже при температуре около  $1830\text{ }^\circ\text{C}$  [18]. Поэтому для получения диборида хрома в виде порошка синтез его целесообразно проводить при температурах, заведомо не превышающих это значение. Смешивание компонентов осуществлялось в шаровой планетарной мельнице АГО-2С при ускорении 20g, времени смешения 5 мин и отношении массы загрузки к массе шаров 8:150.

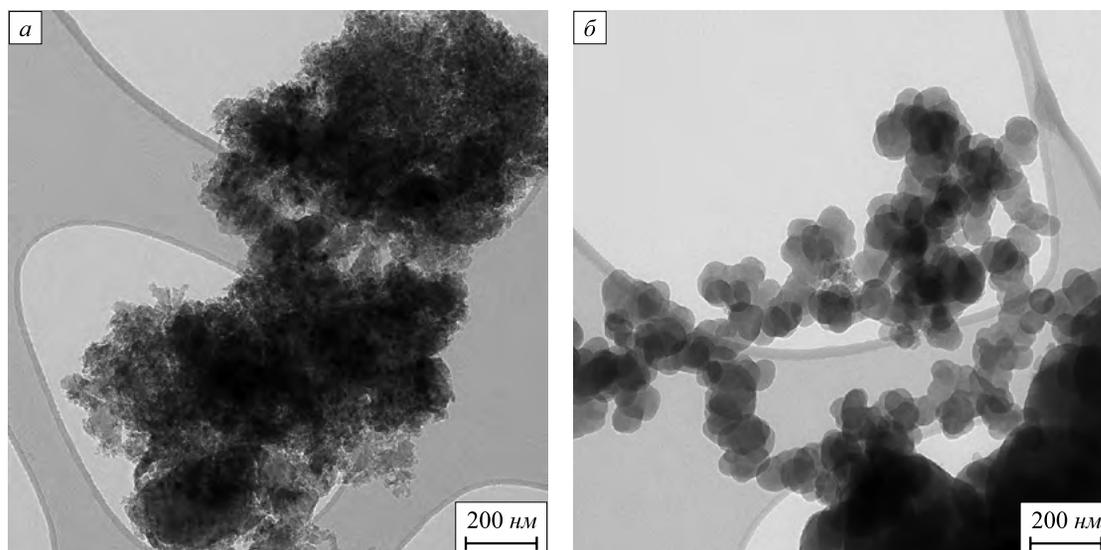


Рис. 1. Снимки ПЭМ образцов измельченных НВУ (а) и сажи (б)

Fig. 1. TEM images of the samples of grinded NFC (a) and carbon black (b)

Изменение свободной энергии для реакции (1) при давлении монооксида углерода 0,1 МПа, вычисленное по термодинамическим данным [1, 19], становится отрицательным при температурах выше 1210 К, или около 940 °С. При уменьшении давления СО эта температура существенно снижается. Например, при давлении СО, равном 0,0001 МПа, она составляет примерно 890 К, или около 620 °С. Для обеспечения полноты протекания реакции (1) могут потребоваться более высокие температуры. Эксперименты были проведены при температурах: 1300, 1500 и 1700 °С (образцы 1, 2, 3 соответственно). Время выдержки шихты при этих температурах во всех случаях составляло 20 мин, поскольку на основании предыдущих экспериментов [16, 17] было установлено, что для такой массы шихты оно является оптимальным. Температуры плавления всех реагентов выше [1, 19, 20], поэтому при термической обработке шихты жидкая фаза должна отсутствовать. Диборид хрома плавится при температуре около 2200 °С [1], в связи с чем при температурах процесса он должен образовываться в порошкообразном состоянии.

Эксперименты выполнялись в индукционной печи тигельного типа модели ВЧ-25АВ (ООО ТД «Мосиндуктор») в среде аргона, что уменьшало парциальное давление СО и позволяло снижать температуру синтеза и предотвращать нежелательное азотирование карбида бора. Шихта массой примерно 20 г засыпалась в тигли из углерода, помещаемые в кварцевый реактор. Через реактор, вставляемый в многovitковый индуктор печи, продувался аргон. Температура в реакторе измерялась пирометром. После завершения реакции реактор охлаждался до комнатной температуры в потоке аргона и после этого продукты реакции извлекались из тигля. Определение полноты прохождения реакции проводилось путем взвешивания шихты и продуктов реакции

и сопоставления экспериментальных данных с теоретическими (теоретическая потеря массы составляет 36,16 % (по массе), а с учетом незначительного содержания примесей в реагентах немного ниже).

Продукты реакций исследовались рентгенофазовым анализом на дифрактометре ДРОН-3 с использованием  $\text{CuK}\alpha$ -излучения ( $\lambda = 0,15406$  нм). Размер кристаллитов в фазе диборида хрома определяли по формуле Шеррера с учетом инструментального уширения [21]. Определение содержания бора и прочих элементов выполнялось методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП) на спектрометре IRIS Advantage (Thermo Jarrell Ash Corporation). Морфологию поверхности и элементный состав образцов изучали на растровом электронном микроскопе (РЭМ) S-3400N производства фирмы «Hitachi», оборудованном приставкой для энергодисперсионного анализа производства фирмы «Oxford Instruments». Текстульные характеристики образцов определяли по изотермам низкотемпературной адсорбции и десорбции азота при 77 К, полученным на приборе Quantachrom NOVA 2200e. Седиментационный анализ выполняли на лазерном анализаторе частиц MicroSizer 201 ВА Инструментс. Термоокислительную стабильность полученных образцов определяли с использованием прибора синхронного термического анализа NETZSCH STA 449 С Jupiter.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам экспериментов для образцов 1, 2, 3 убыль массы составляет 24,4; 31,1 и 36,1 % (по массе) соответственно. Из представленных результатов следует, что при температурах 1300 и 1500 °С реакция боридообразования имеет место, однако не проходит до

конца. Значение убыли массы, близкое к расчетному, относится к образцу, синтезированному при 1700 °С. Дифрактограммы образцов приведены на рис. 2.

Дифрактограмма образца, синтезированного при температуре 1300 °С, представлена пиками, относящимися к фазам CrB, Cr<sub>3</sub>B<sub>4</sub>, CrB<sub>2</sub>. На дифрактограмме образца, полученного при температуре 1500 °С, имеются рефлексы фаз CrB, CrB<sub>2</sub> и наиболее четкий рефлекс фазы Cr<sub>3</sub>B<sub>4</sub>. Вероятно, процесс образования диборида хрома протекает через постепенное превращение фаз CrB → Cr<sub>3</sub>B<sub>4</sub> → CrB<sub>2</sub> (от низших по содержанию бора к высшим).

По результатам элементного анализа, выполненного методом АЭС-ИСП, в образце 3 (химическое превращение в данных условиях осуществляется практически полностью) содержание хрома и бора составляет 68,06 и 31,07 % (по массе) соответственно. Расчетное содержание хрома в дибориде хрома составляет 70,27 % (по массе), а бора 29,73 % (по массе). Таким образом, содержания основных элементов в образце 3 близки к расчетным, что свидетельствует о значительной чистоте продукта реакции (на уровне примесей в нем содержатся Al, Mn, Zn, Fe, Co, Ni). Суммарное их содержание составляет 1,56 % (по массе). С учетом возможного содержания в дибориде хрома некоторых количеств кислорода и углерода наличие примесей в нем можно оценить в пределах примерно 2,5 % (по массе). Применение более высокой температуры нецелесообразно, поскольку это явно приведет к нежелательному увеличению размеров частиц. Таким образом, оптимальные условия синтеза диборида хрома в данном случае следующие: мольное соотношение реагентов по стехиометрии для осуществления реакции (1), выдержка в течение 20 мин при температуре 1700 °С.

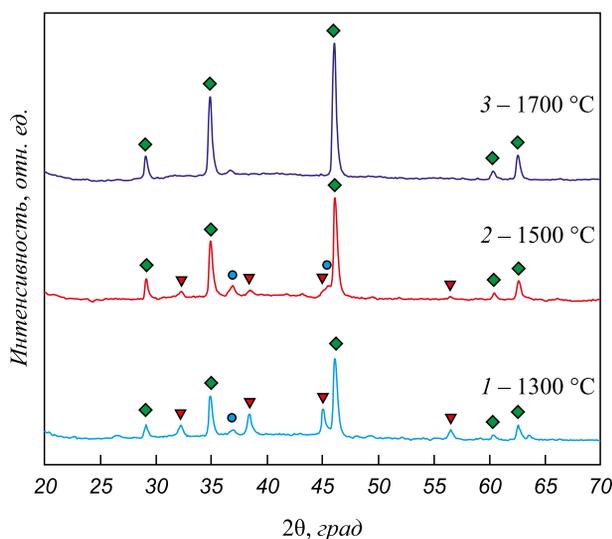


Рис. 2. Дифрактограммы образцов 1 – 3:

● – Cr<sub>3</sub>B<sub>4</sub>; ▼ – CrB; ◆ – CrB<sub>2</sub>

Fig. 2. XRD patterns of the samples 1 – 3:

● – Cr<sub>3</sub>B<sub>4</sub>; ▼ – CrB; ◆ – CrB<sub>2</sub>

Электронные микрофотографии образцов, полученных при разных температурах, представлены на рис. 3. При температурах термической обработки 1300 °С (образец 1) и 1500 °С (образец 2) целевая реакция проходит не до конца, о чем свидетельствует наличие на снимках частиц разной морфологии. Образец, синтезированный при 1700 °С, представлен однородными частицами неправильной формы с размерами преимущественно 1 – 5 мкм. Некоторые частицы образуют агрегаты размерами 20 – 30 мкм. По результатам энерго-

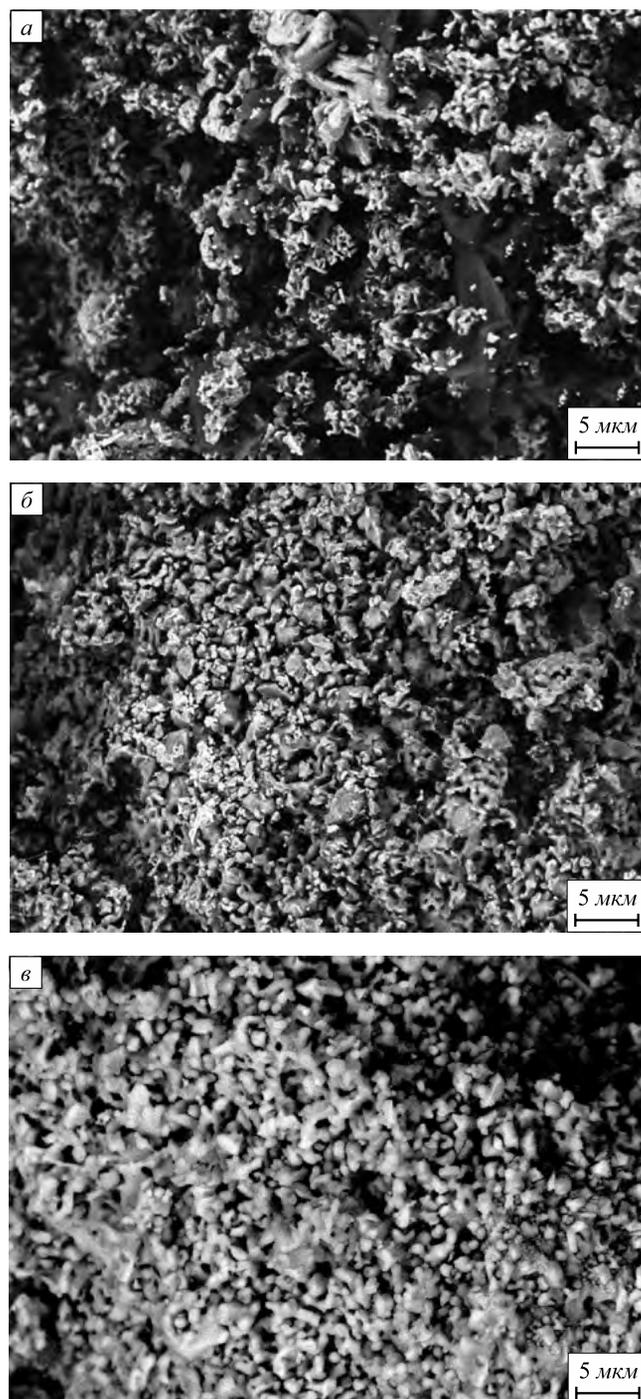


Рис. 3. Снимки СЭМ образцов 1 (а), 2 (б), 3 (в)

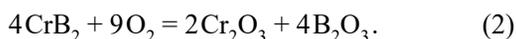
Fig. 3. SEM images of the samples 1 (a), 2 (б), 3 (в)

дисперсионного анализа образец 3 содержит хром, бор, а также незначительные количества кислорода и углерода; наличие азота не обнаружено, поскольку синтез проводился в среде аргона.

Значение площади удельной поверхности однофазного образца 3 составляет  $3600 \text{ м}^2/\text{кг}$ ; тогда средний размер «первичных» частиц в нем, оцененный в предположении их шарообразной формы, составляет 319 нм.

По методике, приведенной в работе [22], «геометрическим методом» определены средние размеры частиц/агрегатов, величины стандартных отклонений, диапазонов дисперсности и показателей асимметричности. Их значения следующие: средний размер частиц 7,95 мкм, средний размер 50 % (по массе) частиц  $D_{50} = 8,48 \text{ мкм}$ , стандартное отклонение 2,24 мкм, степень асимметричности  $-0,16$ . Из этих сведений следует, что частицы/агрегаты диборида хрома имеют широкий диапазон распределения по размерам (полидисперсны), а кривая распределения по размерам симметрична. Размеры «первичных» частиц в образце значительно меньше (см. выше, 319 нм  $\approx 0,3 \text{ мкм}$ ).

При нагреве диборида хрома в кислороде термодинамически наиболее вероятно протекание следующей реакции [23]:



Расчетная прибыль массы при этом составляет 97,30 % (по массе).

На рис. 4 представлена дериватограмма образца 3. Температура начала окисления этого образца составила примерно 430 °С. При температуре 1000 °С образец окислился частично, так как прирост массы составил всего примерно 25 % (по массе). Следовательно, доля окисленного диборида составила  $25/97,30 \approx 0,26$ . Это предположительно связано с защитным действием образующейся на поверхности частиц жидкой пленки оксида бора. Отсутствие экзотермического эффекта, сопровождающегося убылью массы при температуре около 500 °С, свидетельствует о практически полном отсутствии в образце примеси свободного углерода.

## Выводы

Проведено исследование процесса синтеза высокодисперсного порошка диборида хрома карбидоборным методом с использованием нановолокнистого углерода. Процесс проведен в индукционной печи тигельного типа в среде аргона. Оптимальные параметры процесса следующие: массовое соотношение реагентов по стехиометрии на диборид  $\text{CrB}_2$ ; время выдержки при температуре 1700 °С составляет 20 мин. Полученный продукт однофазный и содержит только диборид  $\text{CrB}_2$  с незначительным количеством примесей – примерно 2,5 % (по массе). По результатам растровой электронной микроскопии установлено, что частицы диво-

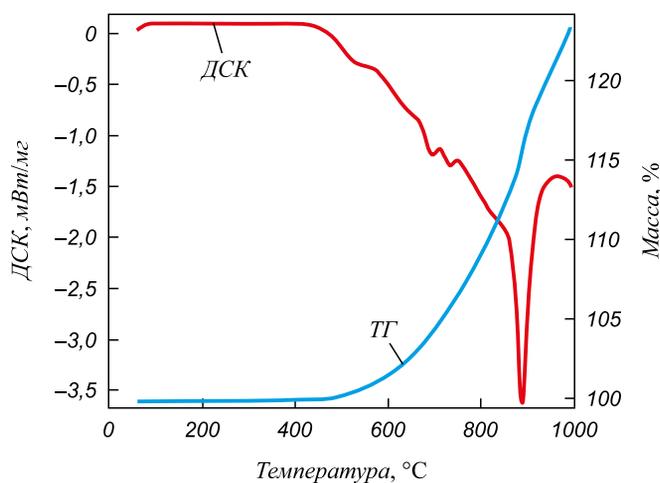


Рис. 4. Кривые ТГ/ДСК образца 3

Fig. 4. TG/DSC curves for sample 3

рида хрома имеют неправильную форму с размером 1 – 5 мкм. Частицы агрегированы. Величина площади удельной поверхности однофазного образца составляет  $3600 \text{ м}^2/\text{кг}$ , средний размер частиц/агрегатов 7,95 мкм. Частичное окисление диборида хрома происходит в температурном диапазоне 430 – 1000 °С. Показано, что нановолокнистый углерод может быть эффективно использован для синтеза диборида хрома.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Свойства, получение и применение тугоплавких соединений: Справочник / Под ред. Т.Я. Косолаповой. – М.: Металлургия, 1986. – 928 с.
2. Артемьев А.А., Соколов Г.Н., Дубцов Ю.Н., Лысак В.И. Формирование композиционной структуры износостойкого наплавленного металла с боридным упрочнением // Изв. вуз. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2011. № 2. С. 44 – 48.
3. Jordan L.R., Betts A.J., Dahm K.L., Dearnley P.A., Wright G.A. Corrosion and passivation mechanism of chromium diboride coatings on stainless steel // Corrosion Science. 2005. Vol. 47. P. 1085–1096.
4. Dearnley P.A., Schellewald M., Dahma K.L. Characterisation and wear response of metal-boride coated WC–Co // Wear. 2005. Vol. 259. P. 861 – 869.
5. Yamada S., Hirao K., Yamauchi Y., Kanzaki S. Mechanical and electrical properties of  $\text{B}_4\text{C} - \text{CrB}_2$  ceramics fabricated by liquid phase sintering // Ceramics International. 2003. Vol. 29. P. 299 – 304.
6. Макаренко Г.Н., Крушинская Л.А., Тимофеева И.И., Мазера В.Е., Васильковская М.А., Уварова И.В. Особенности формирования диборидов переходных металлов IV-VI групп в процессе механохимического синтеза // Порошковая металлургия. 2014. № 9/10. С. 24–32.
7. Yeh C.L., Wang H.J. Preparation of borides in Nb–B and Cr–B systems by combustion synthesis involving borothermic reduction of  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  and  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  // Journal of Alloys and Compounds. 2010. Vol. 490. P. 366–371.
8. Горбунов А.Е. Углетермический метод получения боридов хрома, молибдена и циркония // Порошковая металлургия. 1966. № 11. С. 52 – 56.
9. Torabi O., Golabgir M.H., Tajizadegan H. An investigation on the formation mechanism of nano  $\text{CrB}_2$  powder in the  $\text{Mg}-\text{B}_2\text{O}_3$ -

- Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2015. Vol. 51. P. 50–55.
10. Карасев А.И. Получение порошков технических боридов титана, циркония, хрома и вольфрама борокарбидным методом // Порошковая металлургия. 1973. № 10. С. 1 – 5.
  11. Карбид бора / П.С. Кислый, М.А. Кузенкова, Н.И. Боднарук, Б.Л. Грабчук – Киев: Наукова Думка, 1988. – 216 с.
  12. Sonber J.K., Murthy T.S.R.Ch., Subramanian C., Kumar S., Fotedar R.K., Suri A.K. Investigation on synthesis, pressureless sintering and hot pressing of chromium diboride // International Journal of Refractory Metals & Hard Materials. 2009. Vol. 27. P. 912–918.
  13. Новые материалы и технологии. Экстремальные технологические процессы / Под ред. М.Ф. Жукова. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1992. – 183 с.
  14. Серебрякова Т.И., Неронов В.А., Пешев П.Д. Высокотемпературные бориды. – М.: Металлургия, Челябинское отделение, 1991. – 368 с.
  15. Kuvshinov G.G., Mogilynykh Yu.L., Kuvshinov D.G., Yermakov D.Yu., Yermakova M.A., Salanov A.N., Rudina N.A. Mechanism of porous filamentous carbon granule formation on catalytic hydrocarbon decomposition // Carbon. 1999. Vol. 37. P. 1239–1246.
  16. Krutskii Yu.L., Bannov A.G., Sokolov V.V. etc. Synthesis of highly dispersed boron carbide from nanofibrous carbon // Nanotechnologies in Russia. 2013. Vol. 8. No. 3/4. P. 191–198.
  17. Krutskii Yu.L., Bannov A.G., Antonova E.V. etc. Synthesis of fine dispersed titanium diboride from nanofibrous carbon // Ceramics International. 2017. Vol. 43. P. 3212 – 3217.
  18. Самсонов Г.В., Виницкий И.М. Тугоплавкие соединения: Справочник. – М.: Металлургия, 1976. – 560 с.
  19. Физико-химические свойства окислов: Справочник / Под ред. Г.В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.
  20. Свойства элементов: Справочник / Под ред. М.Е. Дриц. – М.: Металлургия, 1985. – 672 с.
  21. West A.R. Solid State Chemistry and Its Applications. Part I. Chichester, John Wiley, 1984. – 734 p.
  22. Blott S.J., Pye K. A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments // Earth Surface Processes and Landforms. 2001. Vol. 26. P. 1237–1248.
  23. Войтович Р.Ф. Окисление карбидов и нитридов. – Киев: Наукова Думка, 1981. – 192 с.

Поступила 6 июня 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 10, pp. 800–806.

## SYNTHESIS OF FINELY DISPERSED CHROMIUM DIBORIDE FROM NANOFIBROUS CARBON

Yu.L. Krutskii<sup>1</sup>, K.D. Dyukova<sup>2</sup>, R.I. Kuz'min<sup>1</sup>, O.V. Netskina<sup>3,4</sup>, A.E. Iorkh<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>LLC “International Research Center for Thermal Physics and Energy”, Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup>Boreskov Institute of catalysis SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>4</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

**Abstract.** The paper presents experimental data on synthesis of finely dispersed powder of chromium diboride. Chromium diboride was prepared by reduction of chromium oxide Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with nanofibrous carbon (NFC) and boron carbide in the induction furnace under argon atmosphere. NFC is a product of catalytic decomposition of light hydrocarbons. The main characteristic of a NFC is high specific surface area (~150,000 m<sup>2</sup>/kg), which is significantly higher than that of soot (~50,000 m<sup>2</sup>/kg). The content of impurities in NFC is about 1 wt %. Boron carbide used as a reagent is characterized by high dispersity (at the level of ~2 μm) and insignificant content of impurities – no more than 1.5 wt %. Based on analysis of state diagram of the Cr–B system, composition of the charge and upper temperature limit of diboride formation reaction were determined for obtaining chromium diboride in powder state. According to the results of thermodynamic analysis, the temperature of beginning of reaction for chromium oxide Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reduction by carbon and boron carbide was determined at various CO pressures. Composition and characteristics of chromium diboride were studied using X-ray phase analysis, inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (AES-ISP), scanning electron microscopy using local energy-dispersive X-ray microanalysis (EDX), low-temperature adsorption of nitrogen, followed by determination of specific surface area by BET method, sedimentation analysis, synchronous thermogravimetry and differential scanning calorimetry (TG/DSC). The material obtained at optimal parameters is represented by a single phase – chromium diboride CrB<sub>2</sub>. The content of impurities in chromium diboride does not exceed 2.5 wt %. The powder particles were predominantly aggregated. The average size of the particles and aggregates is equal to 7.95 μm within a wide range of size distribution. The specific surface area of a single-phase sample is 3600 m<sup>2</sup>/kg. Oxidation of chromium diboride begins at a temperature of 430 °C and when the temperature reaches 1000 °C, the degree of oxidation is approximately 25 %. Optimum

synthesis parameters are the ratio of reagents according to stoichiometry to obtain chromium diboride at a temperature of 1700 °C and holding time of 20 min. It is shown that for this process nanofibrous carbon is an effective reducing agent and that chromium oxide Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is almost completely reduced to diboride CrB<sub>2</sub>.

**Keywords:** finely dispersed powder, synthesis, chromium diboride, nanofibrous carbon, boron carbide, reduction, induction heating.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-10-800-806

## REFERENCES

1. *Svoistva, poluchenie i primeneniye tugoplavkikh soedinenii: spravochnik* [Properties, production and application of refractory compounds: Reference book]. Kosolapova T.Ya. ed. Moscow: Metallurgiya, 1986, 928 p. (In Russ.).
2. Artem'ev A.A., Sokolov G.N., Dubtsov Yu.N., Lysak V.I. Formation of a composite structure of wear-resistant weld metal with boride hardening. *Izv. vuz. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2014, no.2, pp. 44–48. (In Russ.).
3. Jordan L.R., Betts A.J., Dahm K.L., Dearnley P.A., Wright G.A. Corrosion and passivation mechanism of chromium diboride coatings on stainless steel. *Corrosion Science*. 2005, vol. 47, pp. 1085–1096.
4. Dearnley P.A., Schellewald M., Dahma K.L. Characterisation and wear response of metal-boride coated WC–Co. *Wear*. 2005, vol. 259, pp. 861–869.
5. Yamada S., Hirao K., Yamauchi Y., Kanzaki S. Mechanical and electrical properties of B<sub>4</sub>C–CrB<sub>2</sub> ceramics fabricated by liquid phase sintering. *Ceramics International*. 2003, vol. 29, pp. 299–304.
6. Makarenko G.N., Krushinskaya L.A., Timofeeva I.I., Matsera V.E., Vasil'kovskaya M.A., Uvarova I.V. Features of formation of diborides of transition metals of IV–VI groups in the process of mechanochemical synthesis. *Poroshkovaya metallurgiya*. 2014, no. 9/10, pp. 24–32. (In Russ.).
7. Yeh C.L., Wang H.J. Preparation of borides in Nb–B and Cr–B systems by combustion synthesis involving borothermic reduction of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010, vol. 490, pp. 366–371.
8. Gorbunov A.E. Carbon-thermal method of obtaining borides of chromium, molybdenum and zirconium. *Poroshkovaya Metallurgiya*. 1966, no. 11, pp. 52–56. (In Russ.).

9. Torabi O., Golabgir M.H., Tajizadegan H. An investigation on the formation mechanism of nano CrB<sub>2</sub> powder in the Mg-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2015, vol. 51, pp. 50–55.
  10. Karasev A.I. Preparation of powders of technical borides of titanium, zirconium, chromium and tungsten by borocarbide method. *Poroshkovaya Metallurgiya*. 1973, no. 10. pp. 1–5. (In Russ.).
  11. Kislyi P.S., Kuzenkova M.A., Bodnaruk N.I., Grabchuk B.L. *Karbid bora* [Boron carbide]. Kiev: Naukova Dumka, 1988, 216 p. (In Russ.).
  12. Sonber J.K., Murthy T.S.R.Ch., Subramanian C., Kumar S., Fotedar R.K., Suri A.K. Investigation on synthesis, pressureless sintering and hot pressing of chromium diboride. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*. 2009, vol. 27, pp. 912–918.
  13. *Novye materialy i tekhnologii. Ekstremal'nye tekhnologicheskie protsessy* [New materials and technologies. Extreme technological processes]. Zhukov M.F. ed. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch, 1992, 183 p. (in Russ.).
  14. Serebryakova T.I., Neronov V.A., Peshev P.D. *Vysokotemperaturnye boridy* [High-temperature borides]. Moscow: Metallurgiya, Chelyabinsk Branch, 1991, 368 p. (In Russ.).
  15. Kuvshinov G.G., Mogilnykh Yu.L., Kuvshinov D.G., Yermakov D.Yu., Yermakova M.A., Salanov A.N., Rudina N.A. Mechanism of porous filamentous carbon granule formation on catalytic hydrocarbon decomposition. *Carbon*. 1999. vol. 37, pp. 1239–1246.
  16. Krutskii Yu.L., Bannov A.G., Sokolov V.V. Synthesis of highly dispersed boron carbide from nanofibrous carbon. *Nanotechnologies in Russia*. 2013, vol. 8, no. 3/4, pp. 191–198.
  17. Krutskii Yu.L., Bannov A.G., Antonova E.V., Sokolov V.V., Pichugin A.Yu., Maksimovskii E.A., Krutskaya T.M., Netskina O.V., Bataev I.A. Synthesis of fine dispersed titanium diboride from nanofibrous carbon. *Ceramics International*. 2017, vol. 43. pp. 3212–3217.
  18. Samsonov G.V., Vinitskii I.M. *Tugoplavkie soedineniya: spravochnik* [Refractory compounds: Reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1976, 560 p. (In Russ.).
  19. *Fiziko-khimicheskie svoystva okislov: spravochnik* [Physics and chemical properties of oxides: Reference book]. Samsonov G.V. ed. Moscow: Metallurgiya, 1978, 472 p. (In Russ.).
  20. *Svoystva elementov: spravochnik* [Properties of elements: Reference book]. Drits M.E. ed. Moscow: Metallurgiya, 1985, 672 p. (in Russ.).
  21. West A.R. *Solid State Chemistry and Its Applications. Part I*. Chichester, John Wiley, 1984, 734 p.
  22. Blott S.J., Pye K. Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2001, vol. 26, pp. 1237–1248.
  23. Voitovich R.F. *Okislenie karbidov i nitridov* [Oxidation of carbides and nitrides]. Kiev: Naukova Dumka, 1981, 192 p. (In Russ.).
- Acknowledgement.** The study was carried out at Novosibirsk State Technical University with financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under an integrated project aimed to develop a high-tech production facility (agreement no. 02.G25.31.0144 of 01.12.2015).
- Information about the authors:**
- Yu.L. Krutskii**, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Chemistry and Chemical Technology"* (j\_krutskii@rambler.ru)
- K.D. Dyukova**, *Engineer of analytical Laboratory* (dyukova\_kx701@mail.ru)
- R.I. Kuz'min**, *Postgraduate of the Chair "Materials Science in Mechanical Engineering"* (kuzmin.2010@corp.nstu.ru)
- O.V. Netskina**, *Cand. Sci. (Chem.), Senior Researcher of the Laboratory of Hydride Investigation* (netskina@catalysis.ru)
- A.E. Iorkh**, *Bachelor of the Chair "Materials Science in Mechanical Engineering"* (fronghlight@mail.ru)

Received June 6, 2018

УДК 504.062:[658.567.1:622.713]

## СОЦИАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННАЯ ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО РАЙОНА

*Шорохова А.В., к.т.н., старший преподаватель кафедры бизнеса  
и инноваций (Shoroxova\_a@mail.ru)*

*Новичихин А.В., д.т.н., доцент, заведующий кафедрой транспорта  
и логистики (novitchihin@bk.ru)*

*Юрьева Е.Н., соискатель степени к.т.н. кафедры транспорта и логистики*

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

**Аннотация.** Разработана концепция социально ориентированной информационной технологии, основанная на интеграции диверсификационных и технологических процессов для создания дополнительной продукции и объектов инфраструктуры путем поэтапного структурного синтеза процессов переработки и восстановления нарушенных земель. Предложена структура концепции, состоящая из эмпирических предпосылок, принципов, модели повышения уровня экологической безопасности, показателей оценки требований, результатов реализации и критериев достоверности. Основные принципы повышения уровня экологической безопасности: предотвращение экологического ущерба, внедрение полного цикла рационального природопользования; согласование интересов органов государственной власти, инвесторов, собственников и социума; интеграция технологий переработки отходов, рекультивация нарушенных земель и создание объектов социальной инфраструктуры. Концептуальная модель повышения уровня экологической безопасности отражает взаимодействие основного и вспомогательного производства утилизации техногенных ресурсов и восстановления нарушенных территорий с последующим созданием объектов инфраструктуры. Результаты реализации социально ориентированной информационной технологии отвечают характеристикам: предметность, интерпретируемость, проверяемость, достоверность, полнота, непротиворечивость. В соответствии с предложенным инструментарием разработаны сценарии повышения уровня экологической безопасности города Новокузнецка в условиях функционирующих предприятий черной металлургии с получением из отходов сырья для самой металлургической промышленности, материалов для строительных нужд (строительных кирпичей, добавок к бетону), удобрений для сельского хозяйства. Получены прогнозные оценки сценариев до 2037 года: экономический эффект; площадь восстановленных земель; объем загрязнений окружающей среды, полученных в результате производственной деятельности; численность населения горно-металлургического района; нормативные показатели; предотвращенный объем загрязнения, приходящийся на душу населения. Строительство комплекса планируется в течение 2019 – 2020 гг., ввод в эксплуатацию в 2021 г., поэтапное создание объектов социальной инфраструктуры с 2033 г. В результате моделирования выявлены ежегодный рост прогнозных показателей по рассматриваемым сценариям за счет синтеза поэтапных процессов переработки отходов и восстановления нарушенных земель, снижение объема загрязнений природной среды, обусловленное вводом в эксплуатацию без- и малоотходных производств.

**Ключевые слова:** концепция, информационная технология, концептуальная модель, критерии достоверности, переработка отходов.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-807-812

### ВВЕДЕНИЕ

Рост объемов добычи и обогащения полезных ископаемых, являющихся сырьем для металлургической промышленности, обуславливает перманентное ухудшение показателей экологической обстановки, качества жизни населения горно-металлургических районов и увеличение нагрузки техногенного эффекта [1 – 3]. Ухудшение экологической и социальной обстановки предопределено постоянным увеличением нарушенных площадей, которые используются для складирования отходов горно-перерабатывающих предприятий и металлургических заводов [4, 5]. Следует отметить, что современные мало- и безотходные технологии по переработке отходов обеспечивают их эффективную утилизацию и получение продукции из техногенных ресурсов [6 – 12]. В 2017 г. переработка отходов от про-

изводства сырья для нужд металлургических заводов составила около 53 % [13, 14].

Таким образом, особое значение приобретают переработка ресурсов техногенных месторождений и восстановление земель, подвергнутых промышленным воздействиям. Создание различных объектов инфраструктуры на территории рекультивированных техногенных месторождений направлено на снижение и ликвидацию негативного влияния производств для создания благоприятных условий жизнедеятельности социума и повышения уровня экологической безопасности (ЭБ) горно-металлургических районов.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой связи предлагается концепция социально ориентированной информационной технологии повы-

шения уровня ЭБ посредством интеграции диверсификационных и технологических процессов, ориентированная на улучшение социально-экологической обстановки с созданием дополнительной продукции и объектов инфраструктуры путем поэтапного структурного синтеза процессов переработки отходов, высвобождения и восстановления земель для повышения качества жизни населения [15].

Концептуальная структура социально ориентированной информационной технологии повышения уровня ЭБ горно-металлургического района представлена на рис. 1. Предлагаемая технология предусматривает утилизацию техногенных отходов, уменьшение затрат на охрану окружающей среды и снижение себестоимости основной и дополнительной продукции (полученной из отходов), снижение техногенного воздействия на окружающую среду, создание новых рабочих мест за счет строительства и использования объектов социальной инфраструктуры.

Выбор комплекса технологий переработки ресурсов техногенных месторождений, технологической и биологической рекультивации осуществляется с учетом параметров отвалов и отстойников (химический состав, зольность, влажность, марка угля, площадь нарушенных территорий и прочие) с их последующим комплексированием. Компоненты теоретических основ концепции состоят из принципов, концептуальной модели, требований реализации и показателей.

В соответствии с концепцией предложены следующие принципы [15]:

1 – предотвращение социально-экологического ущерба посредством проведения мероприятий по внедрению полного цикла рационального недропользования, контроль за образованием отходов, за нарушениями почвенного покрова, своевременная ликвидация и переработка техногенных ресурсов, что позволит уменьшить площадь отчуждаемых земель;

2 – диверсификация технологических процессов перерабатывающих предприятий и металлургических заводов – разрабатывается и корректируется проектная документация предприятий с внедрением мало- и безотходных производств, модернизируется существующее оборудование;

3 – выпуск дополнительной продукции, полученной из отходов, – при производстве осуществляется контроль качества товарного продукта, что увеличивает конкурентоспособность и рыночный спрос на эту продукцию;

4 – согласованность экологических, экономических и социальных интересов собственников, инвесторов, органов государственной власти и социума на основе показателей ЭБ обеспечит их заинтересованность во внедрении мало- и безотходных производств;

5 – поэтапная интеграция процессов переработки, рекультивации и создания объектов социальной инфраструктуры посредством параллельных процедур позволит экономически эффективно высвободить финансовые, минеральные и земельные ресурсы.

В соответствии с разработанной концепцией предлагается модель повышения уровня ЭБ горно-металлур-



Рис. 1. Концептуальная структура социально ориентированной информационной технологии повышения уровня ЭБ горно-металлургического района [15]

Fig. 1. Conceptual structure of socially oriented information technology for raising the level of ecologic safety of mining and metallurgical region [15]

гического района (рис. 2). Входные параметры модели: уровни выбросов, объем отходов, площадь нарушенных земель, виды и характеристики сырья, на выходе – дополнительная продукция из отходов, прибыль, новые рабочие места, объекты социальной инфраструктуры. В результате внедрения современных безотходных технологий производится дополнительная продукция из отходов (рис. 2).

При ликвидации базового производства вспомогательное становится основным, что обеспечивает конкурентоспособность горнопромышленных и металлургических предприятий на рынке и увеличивает время функционирования этих предприятий. Восстановление освобожденных земель осуществляется в два этапа: технологическая и биологическая рекультивация. На восстановленных территориях создаются объекты социальной инфраструктуры.

При строительстве объектов социальной инфраструктуры возможно использование отходов горнодобывающих, перерабатывающих и металлургических производств, в том числе вскрышных пород.

Учитывая неблагоприятную экономическую ситуацию в горно-металлургических районах, создание объектов инфраструктуры предполагается за счет частных инвесторов. При этом на восстановленных территориях возможно строительство как объектов промышленного, так и сельскохозяйственного назначения.

В соответствии с информационной технологией (рис. 1) представлены система управления, комплекс

показателей оценки, организационно-технологический механизм управления ЭБ, сценарии повышения уровня ЭБ, которые характеризуются следующими параметрами (в соответствии с методологией работ [16, 17]):

1 – предметность – все компоненты теоретических основ концепции и результаты ее реализации направлены на повышение уровня ЭБ горно-металлургического района;

2 – интерпретируемость – наличие эмпирически интерпретируемых результатов реализации концепции и рекомендаций для повышения уровня ЭБ горно-металлургического района;

3 – проверяемость – соответствие результатов реализации концепции функционированию реального объекта. Отклонение результатов прогнозных оценок от показателей, основанных на реальных данных, не должно превышать определенного значения;

4 – достоверность – система управления, комплекс показателей, организационно-технологический механизм и сценарии отражают изменение уровня ЭБ и социально-экономического потенциала горно-металлургического района;

5 – полнота – охват всех процессов переработки отходов, рекультивации нарушенных земель и создания объектов инфраструктуры горно-металлургического района, влияющих на уровень его ЭБ;

6 – непротиворечивость – концепция, принципы, результаты ее реализации (система управления, комплекс показателей, организационно-технологический

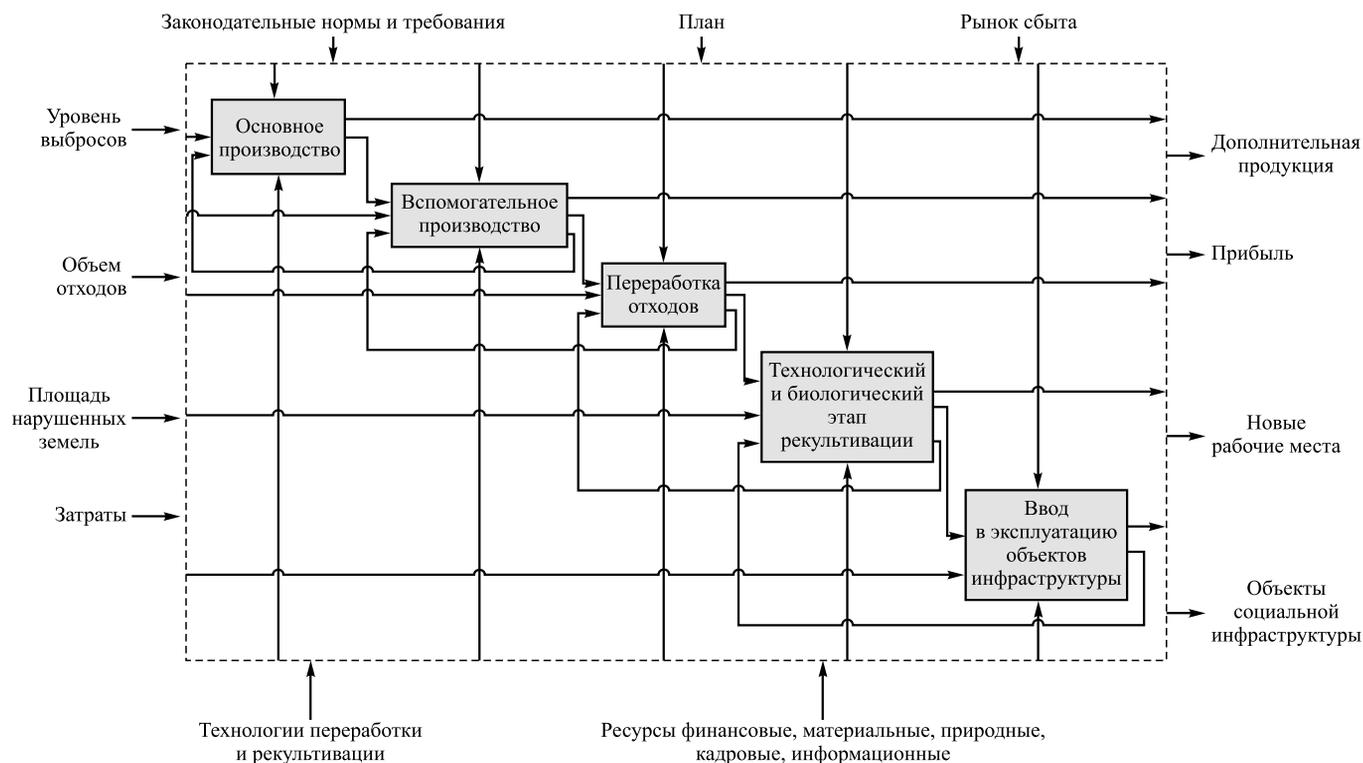


Рис. 2. Концептуальная модель повышения уровня ЭБ

Fig. 2. Conceptual model of raising the level of ES (Ecological Safety)

механизм управления ЭБ, сценарии) не противоречат и обуславливают друг друга.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В соответствии с предлагаемой концепцией для повышения уровня ЭБ города Новокузнецка в условиях функционирующих горнопромышленных предприятий разработан набор сценариев. Рассмотренные сценарии предусматривают строительство комплекса по переработке отходов с получением в дальнейшем сырья для металлургических предприятий (коксования, литейного производства):

C1 – получение угольного концентрата гравитационными методами обогащения (сепараторы с качающейся постелью), строительных и огнеупорных материалов;

C2 – получение угольного концентрата гравитационными методами обогащения (масляная грануляция), материалов для строительных нужд;

C3 – получение угольного концентрата гравитационными методами обогащения в тяжелых средах, кирпичей для строительных нужд;

C4 – получение угольного концентрата гравитационными методами обогащения (масляная грануляция), строительных кирпичей;

C5 – получение угольного концентрата гравитационными методами обогащения (масляная грануляция), клинкера с предварительным дроблением и обжигом;

C6 – получение угольного концентрата гравитационными методами обогащения (масляная грануляция), добавок к бетону;

C7 – получение угольного концентрата гравитационными методами обогащения (в гидроциклонах), добавок к бетону;

C8 – производство удобрений для сельского хозяйства.

Результаты моделирования прогнозных оценок [18] показателей сценариев повышения уровня ЭБ представлены на рис. 3.

С 2019 по 2020 г. планируется осуществить строительство и внедрение безотходных технологий в производство (рис. 3). Вводится в эксплуатацию комплекс по переработке отходов в 2021 г. В период с 2021 по 2033 гг. прогнозируется рост показателей (F1, F2, F4, F5) за счет поэтапной интеграции процессов переработки отходов и восстановления бортов отвала [19, 20] по причине снижения затрат на экологические штрафы и выплаты за хранение отходов. После 2033 г. планируется создание объектов инфраструктуры.

В результате внедрения без- и малоотходных производств планируется ежегодное снижение объема за-

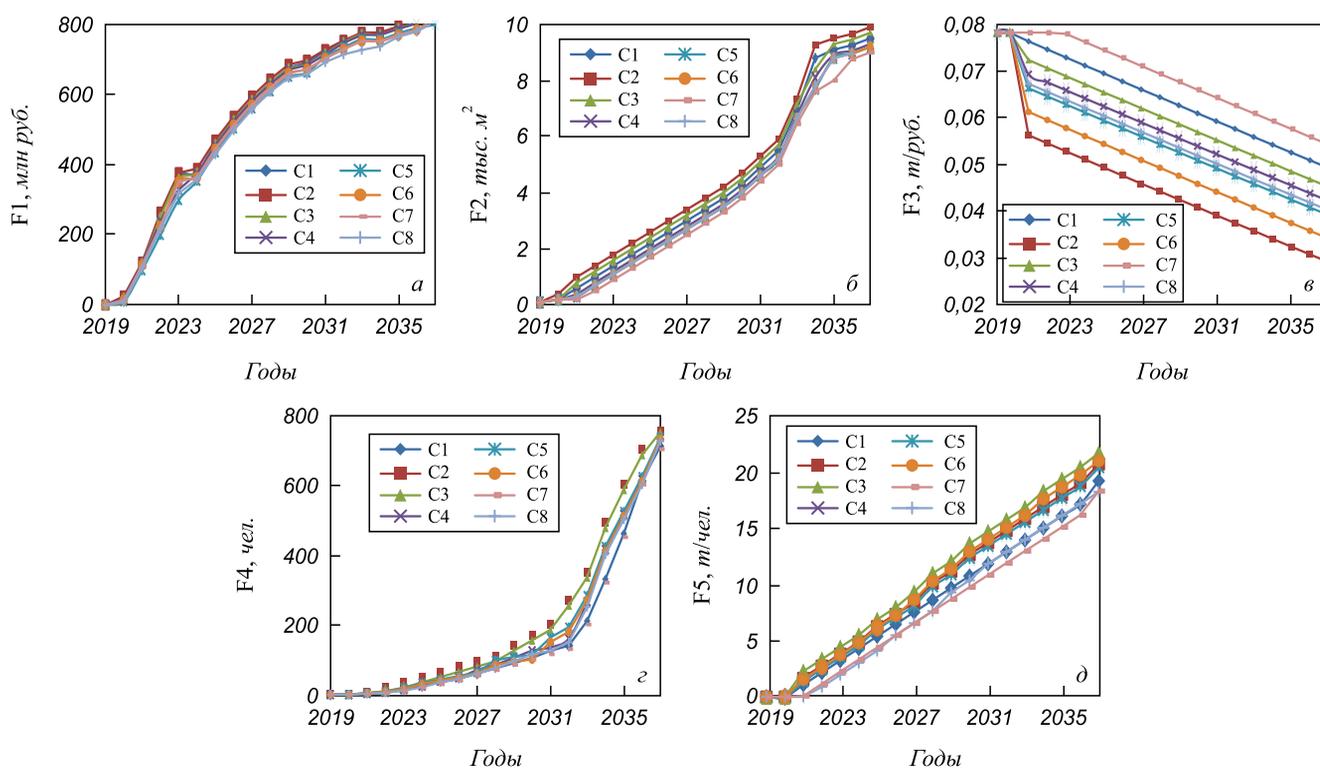


Рис. 3. Прогнозные оценки показателей для сценариев повышения уровня ЭБ города Новокузнецка до 2037 г.: а – экономический эффект; б – площадь восстановленных земель; в – объем загрязнений окружающей среды в результате производственной деятельности; г – численность населения горно-металлургического района с нормативными показателями; д – предотвращенный объем загрязнения, приходящийся на душу населения

Fig. 3. Predicted estimates of indicators for scenarios for raising the level of Novotuznetsk city ES until 2037: а – economic effect; б – area of restored lands; в – volume of environment pollution as a result of production activity; г – population of the mining and metallurgical area with standard indicators; д – the prevented volume of pollution falling per capita

грязнений окружающей среды, обусловленных производственной деятельностью (F3).

## Выводы

Социально ориентированная информационная технология повышения ЭБ горно-металлургического района обеспечит внедрение безотходных технологий, рациональное недропользование и снижение эколого-экономического ущерба. Реализация рассмотренных сценариев повышения уровня ЭБ позволит экономически и экологически эффективно переработать накопленные и образующиеся отходы от производства сырья для нужд металлургической отрасли, снизить негативную деятельность производства, сократить площадь нарушенных земель и уровень безработицы путем создания новых рабочих мест.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Linda S. Environmental Management for Business. – Chichester; New York: J. Wiley, 1996. – 366 p.
2. Tarras-Wahlberga NH., Flachier A., Lane SN., Sangforsd O. Environmental impacts and metal exposure of aquatic ecosystems in rivers contaminated by small scale gold mining: the Puyango River basin, southern Ecuador // The Science of the Total Environment. 2001. Vol. 278. P. 239 – 261.
3. Mummy D.L., Stahl P.D., Buyer J.S. Soil microbiological properties 20 years after surface mine reclamation: spatial analysis of reclaimed and undisturbed sites // Soil biology and chemistry. 2002. Vol. 34. No. 11. P. 1717 – 1725.
4. Steinhauer G., Adlassnig W., Lendl T., Peroutka M., Weidinger M., Lichtscheidl I.K., Bichler M. Metalloid Contaminated Microhabitats and their Biodiversity at a Former Antimony Mining Site in Schlaining, Austria // Open Environmental Sciences. 2009. Vol. 3. P. 26 – 41.
5. Putz H.-J. Final fate of residues from the German recovered paper processing industry. – In book: 7 Research Forum on Recycling, Quebec City, Sept. 27 – 29. – PARTAC, 2004. P. 239 – 244.
6. Moises Frias, Rosario Garcia, Raquel Vigil de la Villa, Sagrario Martinez-Ramirez. Coal Mining Waste as a Future Eco-Efficient Supplementary Cementing Material: Scientific Aspects // Recycling. 2016. No. 1 (2). P. 232 – 241.
7. Mineral processing plant design, practice and control. Vol. 1. SME Symposium proceedings, Vancouver, B.C., Canada, Oct. 20 – 24, 2002. – 1264 p.
8. Thiel R.S., Smith M.E. State of the practice review of heap leach pad design Issues // Proc. GRI-18, Las Vegas, Nevada, USA. 2003. Vol. 22. P. 555 – 568.
9. Raymond L. Lowrie. Mining Reference Handbook. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. Inc. (SME), 2002, Electronic edition published, 2009. – 448 p.
10. Шувалов Ю.В., Никулин А.Н. Ресурсосберегающие технологии получения тепловой энергии на основе переработки твердых горючих углеродсодержащих отходов // Записки горного института. 2007. Т. 170. № 1. С. 139 – 141.
11. Ческидов В.В., Сенченко Д.С. Учебно-рекреационная рекултивация карьерных комплексов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 7. С. 238 – 241.
12. Попов С.М., Резников Е.Л. Методические основы экономической оценки условий для размещения отходов в угольных шахтах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 3. С. 20 – 23.
13. Таразанов И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2015 года // Уголь. 2016. № 3. С. 58 – 72.
14. Образование, использование и обезвреживание отходов производства и потребления по видам экономической деятельности в Российской Федерации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_main/rosstat/ru/statistics/environment/#](http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/environment/#). (Дата обращения 12.07.2018).
15. Шорохова А.В., Новичихин А.В. Повышение уровня экологической безопасности горнопромышленного района: концепция и конкретизация // Экономика и менеджмент систем управления. 2017. Т. 26. № 4.1. С. 188 – 194.
16. Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология. – М.: СИНТЕГ, 2007. – 668 с.
17. Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология: словарь системы основных понятий. – М.: Либроком, 2013. – 208 с.
18. Шорохова А.В., Новичихин А.В. Имитационные модели социально-экологической безопасности горнопромышленных районов // Экономика и менеджмент систем управления. 2016. Т. 22. № 4. С. 93 – 100.
19. Shorokhova A.V., Novichikhin A.V. Processing of iron-ore waste from enrichment plants // Steel in Translation. 2017. Vol. 47. No. 6. P. 378 – 382.
20. Novichikhin A.V., Shorokhova A.V. Systematic processing of iron-ore waste in mining regions // Steel in Translation. 2017. Vol. 47. No. 7. P. 456 – 462.

Поступила 26 сентября 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 10, pp. 807–812.

## SOCIALLY ORIENTED INFORMATION TECHNOLOGY OF INCREASING THE LEVEL OF ECOLOGICAL SAFETY OF MINING AND METALLURGICAL AREA

*A.V. Shorokhova, A.V. Novichikhin, E.N. Yur'eva*

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

**Abstract.** Conceptual bases were developed for socially oriented information technology based on integration of diversification and technological processes for creation of additional production and infrastructure facilities by means of stage-by-stage structural synthesis of processing and restoration of broken lands. The structure of conceptual bases is offered consisting of empirical prerequisites, principles, model of increase in level of ecological safety, indicators of assessment of requirements, results of realization and criteria of reliability. The principles are directed to prevention of ecological damage, full cycle of rational

environmental management, coordination of interests of public authorities, investors, owners and society, integration of technologies of waste processing, land reclamation and creation of objects of social infrastructure. The conceptual model of increase in level of ecological safety reflects interaction of the main and auxiliary production of technogenic resources utilization and restoration of the broken territories with subsequent creation of infrastructure facilities. Results of realization of socially oriented information technology have the following characteristics: concreteness, interpretability, checkability, reliability, completeness and consistency. In compliance with the offered tools, scenarios of increase in level of ecological safety of the city of Novokuznetsk have been developed for conditions of functioning of metallurgical plants producing materials from waste of metallurgical industry, materials for construction needs, construction bricks, addi-

tives to concrete and fertilizers for agriculture. Project scenarios till 2037 are described: economic effect; area of restored lands; volume of environmental pollution as a result of production activity; population of mining and metallurgical area with standard indicators; prevented pollution volume per capita. Construction of plant is planned from 2019 to 2020, with commissioning in 2021; stage-by-stage creation of social infrastructure objects is planned since 2033. As a result of modeling it was revealed as follows: annual growth of expected indicators of scenarios due to synthesis of stage-by-stage operations of waste processing, and restoration of broken lands, decrease in volume of environment pollution caused by commissioning of waste-free and low-waste productions.

**Keywords:** information technology, conceptual model, concept, reliability criteria, waste processing.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-10-807-812

## REFERENCES

- Linda S. *Environmental Management for Business*. Chichester; New York: J. Wiley, 1996, 366 p.
- Tarras-Wahlberga NH., Flachier A., Lane SN., Sangforsd O. Environmental impacts and metal exposure of aquatic ecosystems in rivers contaminated by small scale gold mining: the Puyango River basin, southern Ecuador. *The Science of the Total Environment*. 2001, vol. 278, pp. 239–261.
- Mummey D.L., Stahl P.D., Buyer J.S. Soil microbiological properties 20 years after surface mine reclamation: spatial analysis of reclaimed and undisturbed sites. *Soil biology and chemistry*. 2002, vol. 34, no. 11, pp. 1717–1725.
- Steinhauser G., Adlassnig W., Lendl T., Peroutka M., Weidinger M., Lichtscheidl I.K., Bichler M. Metalloid contaminated microhabitats and their biodiversity at a former antimony mining site in Schläining, Austria. *Open Environmental Sciences*. 2009, vol. 3, pp. 26–41.
- Putz H.-J. Final fate of residues from the German recovered paper processing industry. In: *7 Research Forum on Recycling, Quebec City, Sept. 27 – 29. PARTAC, 2004*, pp. 239–244.
- Moises Frias, Rosario Garcia, Raquel Vigil de la Villa, Sagrario Martinez-Ramirez Coal Mining Waste as a future eco-efficient supplementary cementing material: Scientific Aspects. *Recycling*. 2016, no. 1 (2), pp. 232–241.
- Mineral processing plant design, practice and control. Vol. 1. *SME Symposium proceedings, Vancouver, B.C., Canada, Oct. 20 – 24, 2002*, 1264 p.
- Thiel R.S., Smith M.E. State of the practice review of heap leach pad design Issues. *Proc. GRI-18, Las Vegas, Nevada, USA, 2003*, vol. 22, pp. 555–568.
- Raymond L. Lowrie. *Mining Reference Handbook*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. Inc. (SME), 2002. Electronic edition published, 2009, 448 p.
- Shuvalov Yu.V., Nikulin A.N. Resource-saving technologies for thermal energy production based on processing of solid combustible carbon-containing waste. *Zapiski gornogo instituta*. 2007, vol. 170, no. 1, pp. 139–141. (In Russ.).
- Cheskidov V.V., Senchenko D.S. Educational and recreational rehabilitation of quarry sites. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2007, no. 7, pp. 238–241. (In Russ.).
- Popov S.M., Reznikov E.L. Methodical basics for economic assessment of conditions for waste disposal in coal mines. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2007, no. 3, pp. 20–23. (In Russ.).
- Tarazanov I.G. Production of coal industry in Russia in January-December 2015. *Ugol'*. 2016, no. 3, pp. 58–72. (In Russ.).
- Obrazovanie, ispol'zovanie i obezvezhivanie otkhodov proizvodstva i potrebleniya po vidam ekonomicheskoi deyatel'nosti v Rossiiskoi Federatsii* [Formation, use and disposal of industrial and consumption waste by economic activity in the Russian Federation]. Electronic resource. Available at URL: [http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_main/rosstat/ru/statistics/environment/#](http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/environment/#) (Accessed 12.07.2018). (In Russ.).
- Shorokhova A.V., Novichikhin A.V. Improving the level of environmental safety of mining region: concept and specification. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya*. 2017, vol. 26, no. 4.1, pp. 188–194. (In Russ.).
- Novikov A.M., Novikov D.A. *Metodologiya* [Methodology]. Moscow: SINTEG, 2007, 668 p. (In Russ.).
- Novikov A.M., Novikov D.A. *Metodologiya: slovar' sistemy osnovnykh ponyatii* [Methodology: vocabulary of the basic concepts]. Moscow: Librokom, 2013, 208 p. (In Russ.).
- Shorokhova A.V., Novichikhin A.V. Simulation models of social and environmental safety of mining areas. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya*. 2016, vol. 22, no. 4, pp. 93–100. (In Russ.).
- Shorokhova A.V., Novichikhin A.V. Processing of iron-ore waste from enrichment plants. *Steel in Translation*. 2017, vol. 47, no. 6, pp. 378–382.
- Novichikhin A.V., Shorokhova A.V. Systematic processing of iron-ore waste in mining regions. *Steel in Translation*. 2017, vol. 47, no. 7, pp. 456–462.

## Information about the authors:

**A.V. Shorokhova**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Business and Innovation (Shorokhova\_a@mail.ru)

**A.V. Novichikhin**, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair of Transport and Logistics (novitichihin@bk.ru)

**E.N. Yur'eva**, Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Transport and Logistics

Received September 26, 2018

УДК 519.876.2

## ФОРМИРОВАНИЕ ПРОГРАММ ОБУЧЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ERP-СИСТЕМЫ

**Зимин А.В.<sup>1</sup>**, к.т.н., директор (iva70221@rambler.ru)

**Буркова И.В.<sup>2</sup>**, д.т.н., ведущий научный сотрудник (irbur27@mail.ru)

**Митьков В.В.<sup>3</sup>**, старший преподаватель кафедры автоматизации и  
информационных систем (vita-m@ngs.ru)

**Зимин В.В.<sup>3</sup>**, д.т.н., профессор кафедры автоматизации и информационных  
систем (zimin.1945@mail.ru)

<sup>1</sup> ООО «Аудит ЭнергоНовосибирск»

(654005, Россия, Новосибирск, ул. Татарская, 83)

<sup>2</sup> Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН

(117997, Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 65)

<sup>3</sup> Сибирский государственный индустриальный университет

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

**Аннотация.** Один из важных факторов, определяющий длительность начальной (опытно-промышленной) эксплуатации ERP-системы, – это качество подготовки пользователей к совместной работе в интегрированной (на уровне элементарных транзакций) системе управления. Очевидно, что длительность начальной эксплуатации и соответствующие потери от инцидентов, возникающих при эксплуатации ERP-системы, могут быть существенно уменьшены не только за счет качественного проектирования и тестирования ERP-системы, но в значительной мере за счет повышения уровня компетенций пользователей, достигаемых посредством обучения. Приводится математическая постановка задачи формирования программы обучения для пользователей ERP-системы крупной металлургической компании, в которой критерием является общее приращение компетенций пользователей в результате реализации программы обучения. Процедура решения задачи базируется на методе сетевого программирования, который опирается на структурно-подобное сетевое представление критерия и ограничений. В работе приведены общая схема и пример решения исследуемой задачи, в котором отдельные оценочные задачи решены методом дихотомического программирования. Полученные приближенные решения поставленной задачи могут быть улучшены посредством нахождения глобального оптимума исходной задачи методом ветвей и границ, в котором в качестве границ применяются значения целевой функции найденного приближенного решения. На практике бывает целесообразно рассмотреть задачу, обратную к рассмотренной в статье, в которой критерием являются затраты на обучение. В силу структурного подобия функций приращения компетенций и затрат на обучение обратная задача может быть решена по той же схеме, что предложена для прямой задачи. Рассмотренная задача может быть обобщена посредством учета предпочтений пользователей относительно значимости отдельных программ относительно других с помощью введения соответствующих «весов». Общая схема решения задачи при этом не изменится.

**Ключевые слова:** ERP-система, пользователь, программа обучения, компетенция, инцидент, задача оптимизации, метод сетевого программирования, структурно-подобные функции, оценочная задача, метод ветвей и границ.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-813-817

К одному из важных факторов, определяющим длительность начальной (опытно-промышленной) эксплуатации ERP-системы, относится качество подготовки пользователей к совместной работе в интегрированной (на уровне элементарных транзакций) системе управления. На рис. 1 приведены два графика зависимости количества инцидентов, возникающих по вине пользователей на начальном периоде эксплуатации, от качества обучения пользователей ( $A$  – хорошее обучение,  $B$  – неудовлетворительное) [1 – 5].

Очевидно, что длительность начальной эксплуатации и соответствующие потери от инцидентов могут быть существенно уменьшены не только за счет качественного проектирования и тестирования ERP-систе-

мы [1, 2, 6 – 8], но в значительной мере за счет повышения уровня компетенций пользователей.

Пусть  $\left\{ \left\{ p_{ji} \mid i = \overline{1, n_j} \right\} \mid j = \overline{1, m} \right\}$  – множество программ обучения, реализуемых консалтинговой компанией, участвующей в создании ERP-системы. Здесь  $j$  – номер бизнес-процесса,  $i$  – номер программы обучения,  $p_{ji}$  –  $i$ -ая программа обучения для  $j$ -го бизнес-процесса,  $n_j$  – количество программ обучения для  $j$ -го процесса,  $m$  – количество бизнес-процессов. Обозначим через  $c_{ji} = c(p_{ji})$  стоимость обучения одного пользователя по программе  $p_{ji}$ , через  $q_{ji} = q(p_{ji})$  – «приращение» компетенции пользователя (которое будем оценивать в баллах) в результате обучения по программе  $p_{ji}$ , че-

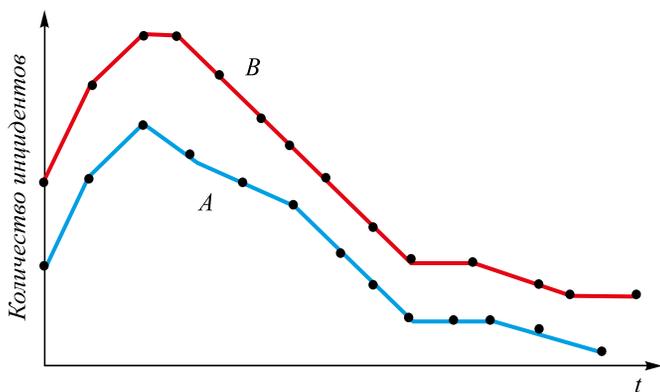


Рис. 1. Зависимость количества инцидентов на начальном периоде эксплуатации ERP-системы от качества обучения пользователей

Fig. 1. Dependence of incidents number at the initial period of ERP system operation on quality of users training

рез  $k_{ji} = k(p_{ji})$  – количество пользователей, которых желательно обучить по программе  $p_{ji}$ . Положим также, что руководство каждого бизнес-процесса накладывает ограничение на минимальное количество  $k_j^* \leq \sum_{i=1}^{n_j} k_{ji}$

прошедших обучение пользователей, при котором оно может приступить к начальной эксплуатации. Обозначим через  $c^*$  предельный объем средств, который руководство предприятия может направить на обучение пользователей.

**Формализация задачи.** Введем переменную

$$x_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{если } p_{ji} \text{ включена в программу обучения} \\ & \text{пользователей;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Рассмотрим следующую математическую модель рассматриваемой задачи:

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} k_{ji} q_{ji} x_{ji} \rightarrow \max; \tag{1}$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} k_{ji} c_{ji} x_{ji} \leq c^*; \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{n_j} k_{ji} x_{ji} \geq k_j^*, j = \overline{1, m}. \tag{3}$$

Решением задачи (1) – (3) является такая программа  $\{x_{ji} | i = \overline{1, n_j}\}_{j = \overline{1, m}}$  обучения пользователей, которая максимизирует суммарное «приращение» компетенций пользователей (соотношение (1)) при заданном ограничении  $c^*$  на предельный объем средств, выделенных на обучение (соотношение (2)), и которая удовлетворяет заданным руководством бизнес-процессов ограничениям на минимально необходимое количество пользователей, подлежащих обучению ( $m$  соотношений (3)).

**Схема решения задачи.** Для решения задачи (1) – (3) применим метод сетевого программирования, который предполагает последовательное решение цепочки оценочных задач, формируемой на основе структурно-подобного сетевого представления целевой функции и ограничений [9 – 14]. Один из вариантов сетевого представления критерия и ограничений сводит решение задачи (1) – (3) к последовательностям задач, выполняемых на двух этапах.

1. Решение методом дихотомического программирования  $m$  задач формирования программ обучения пользователей  $x_j = \{x_{ji} | i = \overline{1, n_j}\}_{j = \overline{1, m}}$  для каждого бизнес-процесса:

$$q_j = \sum_{i=1}^{n_j} k_{ji} q_{ji} x_{ji} \rightarrow \max; \tag{4}$$

$$c_j = \sum_{i=1}^{n_j} k_{ji} c_{ji} x_{ji} \leq c^*; \tag{5}$$

$$k_j = \sum_{i=1}^{n_j} k_{ji} x_{ji} \geq k_j^*. \tag{6}$$

Структурно-подобное сетевое представление функций  $q_j, c_j, k_j$ , используемое для определения последовательности оценочных подзадач для задач (4) – (6), дано на рис. 2.

2. Решение методом дихотомического программирования задачи:

$$q = \sum_{j=1}^m q_j x_j \rightarrow \max; \tag{7}$$

$$c = \sum_{j=1}^m c_j x_j \leq c^*. \tag{8}$$

Структурно-подобное сетевое представление функций  $q$  и  $c$  приведено на рис. 3.

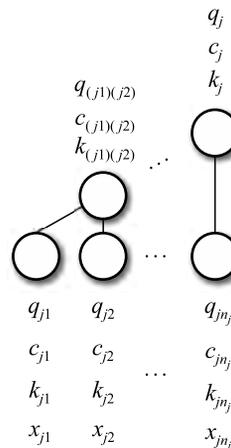


Рис. 2. Сетевое представление функций  $q_j, c_j, k_j$

Fig. 2. Network representation of  $q_j, c_j, k_j$  functions

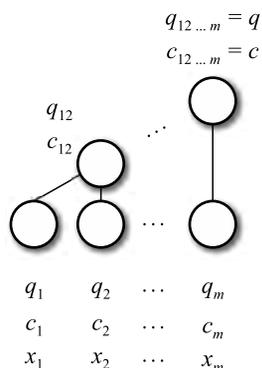


Рис. 3. Сетевое представление функций  $q$  и  $c$

Fig. 3. Network representation of functions  $q$  and  $c$

Это представление сводит решение задачи (7) – (8) к последовательному решению  $(m - 1)$  задачи на основе  $m$  решений, полученных на этапе 1.

**Пример.** Рассмотрим случай с тремя бизнес-процессами ( $m = 3$ ) и соответственно с тремя ( $n_1 = 3$ ), двумя ( $n_2 = 2$ ) и двумя ( $n_3 = 2$ ) программами обучения для этих процессов. Исходные данные для программ обучения приведены в табл. 1.

Положим, что  $c^* = 1100$ . Заметим, что  $c = \sum_{m=1}^3 \sum_{i=1}^{n_i} c_{ji} = 1512$ , т.е. выделенных ресурсов не хватает для обучения всех пользователей. В соответствии со схемой решения решаем задачи (4) – (6) для каждого  $j, j = 1, 3$ .

1. Решение задачи (4) – (6) для  $j = 1$ :

оценка значений  $q_{(11)(12)}, c_{(11)(12)}, k_{(11)(12)}$

	6	18
1	2	5
	128	308
	0	12
0	0	3
	0	180
$x_{12} / x_{11}$	0	1

оценка значений  $q_1 = q_{(11)(12)(13)}, c_1 = c_{(11)(12)(13)}, k_1 = k_{(11)(12)(13)}$

Т а б л и ц а 1

**Исходные данные программ обучения**

Table 1. Initial data of training programs

	$P_{11}$	$P_{12}$	$P_{13}$	$P_{21}$	$P_{22}$	$P_{31}$	$P_{32}$
$q_{ji}$	4	3	5	3	4	5	3
$k_{ji}$	3	2	3	4	3	4	2
$c_{ji}$	60	64	90	54	90	90	54
	$k_1 \geq k_1^* = 5$		$k_2 \geq k_2^* = 3$		$k_3 \geq k_3^* = 2$		

	15	27	21	33
1	3	6	5	8
	270	450	398	578
	0	12	6	18
0	0	3	2	5
	0	180	128	308
$x_{13} / x_{11}x_{12}$	00	10	01	11

Решения, выделенные курсивом, недопустимы по ограничению  $k_1 \geq k_1^* = 5$ .

Допустимые решения задачи для первого процесса следующее:

$q_1$	27	18	21	33
$k_1$	6	5	5	8
$c_1$	450	308	398	578
$x_1 = x_{11}x_{12}x_{13}$	101	110	011	111

Аналогично решаем задачу (4) – (6) для  $j = 2$ :

оценка значений  $q_2 = q_{(21)(22)}, c_2 = c_{(21)(22)}, k_2 = k_{(21)(22)}$

	12	24
1	3	7
	270	486
	0	12
0	0	4
	0	216
$x_{22} / x_{21}$	0	1

Решение (12,4,216) доминирует решение (12,3,270).

Допустимые решения задачи для второго процесса:

$q_2$	27	24
$k_2$	4	7
$c_2$	216	486
$x_2 = x_{21}x_{22}$	10	11

Решение задачи (4) – (6) для  $j = 3$ :

оценка значений  $q_3 = q_{(31)(32)}, c_3 = c_{(31)(32)}, k_3 = k_{(31)(32)}$

	6	26
1	2	6
	108	468
	0	20
0	0	4
	0	360
$x_{32} / x_{31}$	0	1

Допустимые решения задачи для третьего процесса:

$q_3$	6	20	26
$k_3$	2	4	6
$c_3$	108	360	468
$x_3 = x_{31}x_{32}$	01	10	11

2. Решение задачи (7) – (8):

Оценка значений  $q_{12}$ ,  $c_{12}$ ,  $k_{12}$  приведена в табл. 2, 3.

Курсивом отмечены недопустимые по ограничению решения. Лучшее решение выделено подчеркиванием.

При необходимости полученное решение, которое в общем является приближенным, может быть улучшено посредством применения метода ветвей и границ [15 – 20].

На практике бывает целесообразно рассмотреть задачу, обратную к рассмотренной:

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} k_{ji} c_{ji} x_{ji} \rightarrow \min;$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} k_{ji} q_{ji} x_{ji} \geq q^* ;$$

$$\sum_{i=1}^{n_j} k_{ji} x_{ji} \geq k_j^*, j = \overline{1, m}.$$

В силу структурного подобия функций  $c$  и  $q$  она может быть решена по той же схеме, что и прямая задача.

**Выводы.** Предложенный механизм позволяет так распределить ограниченные средства, выделенные на обучение пользователей бизнес-процессов, чтобы максимизировать их суммарную компетентность, существенным образом влияющей на длительность начальной эксплуатации ERP-системы.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. OGC-ITIL V3- 6 Service Lifecycle, Introduction ITIL: TSO, 2007. – 173 p.

2. Основы управления жизненным циклом сервисов систем информатики и автоматизации (лучшие практики ИТЛ): Учеб. пособие / В.В. Зимин, А.А. Ивушкин, С.М. Кулаков, К.А. Ивушкин. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2013. – 500 с.

3. Зимин В.В., Митьков В.В., Зимин А.В. Формирование функционального объема и рабочих групп ERP-проекта предприятия // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. № 12. С. 998 – 1004.

4. Зимин В.В., Митьков В.В., Зимин А.В. Календарное планирование ИТ-сервисов ERP-проекта предприятия // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. № 4. С. 319 – 325.

5. Зимин В.В., Буркова И.В., Митьков В.В., Зимин А.В. Оптимизация объема пилотного тестирования ERP-системы // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. № 6. С. 478 – 484.

6. Математические основы управления проектами / Под ред. В.Н. Буркова. – М.: Высшая школа, 2005. – 432 с.

7. Phillips J.J., Bothell T.W., Snead G.L. The project management scorecards. – Amsterdam: Elsevier, 2003.

8. Wysocky R.K., Beck R., Crane D.B. Effective project management. – N.Y. John Wiley & Sons, 2000.

9. Novikov D.A. Maanagment of active system: stability or efficiency // System Science. 2001. Vol. 26. No. 2. P. 85 – 93.

10. Андронникова Н.Г., Бурков В.Н., Леонтьев С.В. Комплексное оценивание в задачах регионального развития. – М.: ИПУ РАН, 2002. – 54 с.

11. The principles of project management / Pennypacker J.S. ed. – N.Y.: PMI/ 1997.

12. Lientz В.P., Rea К.P. Project management for the 21-st centure. – San Diego: Academic Press. 1998.

13. Bellman R. Mathematical aspects of scheduling theory // Journal of the Society of Industrial and Applied Mathematics. 1956. Vol. 4. P. 168 – 205.

14. Turner J.R. The handbook of project-based management. – London: McGraw-Hill Companies, 1999.

15. Вагнер Г. Основы исследования операций. – М.: Мир, 1972. – 198 с.

16. Gafarov E.R., Lazarev A.A., Werner F. On Lower and Upper Bounds for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem // Preprint 8/10, FMA, Otto-von-Guericke-Universitat Magdeburg, 2010. – 27 p.

17. Уздемир А.П. Динамические целочисленные задачи оптимизации в экономике. – М.: Физматлит, 1995. – 269 с.

18. Сигал И.Х., Иванова А.П. Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы. – М.: Физматлит, 2007. – 304 с.

19. Лазарев А.А. Графический подход к решению задач комбинаторной оптимизации // Автоматика и телемеханика. 2007. № 4. С. 13 – 23.

20. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Как управлять проектами: Научно-практическое издание. – М.: СИНТЕГ – ГЕО, 1997. – 188 с.

Т а б л и ц а 2

Оценка значений  $q_{12}$ ,  $c_{12}$ ,  $k_{12}$

Table 2. Evaluation of  $q_{12}$ ,  $c_{12}$ ,  $k_{12}$

$q_{12}$	54	51	45	42	48	45	60	57
$k_{12}$	10	13	9	13	9	12	12	15
$c_{12}$	666	936	524	794	614	884	794	1064
$x_1$	101	101	110	110	011	011	111	111
$x_2$	10	11	10	11	10	11	10	11

Поступила 13 октября 2017 г.

Т а б л и ц а 3

Оценка значений  $q = q_{123}$ ,  $c = c_{123}$ ,  $k = k_{123}$

Table 1. Evaluation of  $q = q_{123}$ ,  $c = c_{123}$ ,  $k = k_{123}$

$q = q_{123}$	60	51	54	66	74	65	68	80	80	71	<u>74</u>	86
$k = k_{123}$	12	11	11	14	14	13	13	16	16	15	<u>15</u>	18
$c = c_{123}$	774	632	722	902	1026	884	974	1154	1134	992	<u>1082</u>	1262
$x_1$	101	110	011	111	101	110	011	111	101	110	<u>011</u>	111
$x_2$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	<u>10</u>	10
$x_3$	01	01	01	01	10	10	10	10	11	11	<u>11</u>	11

## DEVELOPMENT OF TRAINING PROGRAMS FOR USERS OF ENTERPRISE RESOURCE PLANNING SYSTEM

*A.V. Zimin*<sup>1</sup>, *I.V. Burkova*<sup>2</sup>, *V.V. Mit'kov*<sup>3</sup>, *V.V. Zimin*<sup>3</sup>

<sup>1</sup> LLC “Audit EnergoNovosibirsk”, Russia, Novosibirsk

<sup>2</sup> V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

**Abstract.** One of the important factors (may be, the main one) determining duration of initial (trial) operation of Enterprise Resource Planning (EPR) is quality of users training to collaboration in integrated (at the level of elementary transactions) control system. It is obvious that duration of initial operation and corresponding losses from the incidents arising at EPR operation can be significantly reduced not only due to high-quality design and EPR testing, but, considerably, due to increase in level of competences of users reached by their training. Mathematical definition of training program development for EPR users of large metallurgical company is given in the article. The main criterion there is general increment of users' competences as a result of implementation of training program. Procedure of task solution is based on method of network programming which relies on structural and similar network representation of criterion and restrictions. General scheme and an example of solution of the studied task are provided in which separate estimated tasks are solved by method of dichotomizing programming. Received approximate solutions of an objective can be improved by means of finding global optimum of initial task by method of branches and borders in which values of criterion function of found approximate decision are applied as borders. In practice it is expedient to consider a task, opposite to described in the article in which costs of training are the criterion. Owing to structural similarity of functions of an increment of competences and costs of training the return task can be decided according to the same scheme that it is offered for a direct task. The considered task can be generalized by taking into account the preferences of users regarding the significance of individual programs relative to others by introducing appropriate “scales”. General scheme of task solution won't change.

**Keywords:** ERP-system, user, training program, competence, incident, optimization tasks, network programming method, structurally similar functions, assessment task, branch and boundary method.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-813-817

### REFERENCES

1. OGC-ITIL V3- 6 Service Lifecycle, Introduction ITIL: TSO, 2007, 173 p.
2. Zimin V.V., Ivushkin A.A., Kulakov S.M., Ivushkin K.A. *Osnovy upravleniya zhiznennym tsiklom servisov sistem informatiki i avtomatizatsii (luchshie praktiki ITIL): Ucheb. posobie* [Basics of lifecycle management of services of computer science and automation systems (best practices of ITIL): Tutorial]. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2013, 500 p. (In Russ.).
3. Zimin V.V., Mit'kov V.V., Zimin A.V. Formation of functional volume and working groups of ERP-project of the enterprise. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, no. 12, pp. 998–1004. (In Russ.).
4. Zimin V.V., Mit'kov V.V., Zimin A.V. Calendar planning of IT-services of the enterprise's ERP-project. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, no. 4, pp. 319–325. (In Russ.).
5. Zimin V.V., Burkova I.V., Mit'kov V.V., Zimin A.V. Scoping of pilot testing of enterprise resource planning. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, no. 6, pp. 478–484. (In Russ.).
6. *Matematicheskie osnovy upravleniya proektami* [Mathematical foundations of project management]. Burkova V.N. ed. Moscow: Vysshaya shkola, 2005, 432 p. (In Russ.).
7. Phillips J.J., Bothell T.W., Snead G.L. *The project management scorecards*. Amsterdam: Elsevier, 2003.
8. Wysocky R.K., Beck R., Crane D.B. *Effective project management*. N.Y.: John Wiley & Sons, 2000.
9. Novikov D.A. Management of active system: stability or efficiency. *System Science*. 2001, vol. 26, no. 2, pp. 85–93.
10. Andronnikova N.G., Burkov V.N., Leont'ev S.V. *Kompleksnoe otsenivanie v zadachakh regional'nogo razvitiya* [Comprehensive assessment in tasks of regional development]. Moscow: IPU RAN, 2002, 54 p. (In Russ.).
11. *The principles of project management*. Pennypacker J.S. ed. N.Y.: PMI, 1997.
12. Lientz B.P., Rea K.P. *Project management for the 21-st century*. San Diego: Academic Press. 1998.
13. Bellman R. Mathematical aspects of scheduling theory. *Journal of the Society of Industrial and Applied Mathematics*. 1956, vol. 4, pp. 168–205.
14. Turner J.R. *The handbook of project-based management*. London: McGraw-Hill Companies, 1999.
15. Wagner Harvey M. *Principles of operations research*. Prentice-Hall, 1967. (Russ.ed.: Vagner G. *Osnovy issledovaniya operatsii*. Moscow: Mir, 1972, 198 p.).
16. Gafarov E.R., Lazarev A.A., Werner F. *On Lower and Upper Bounds for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem*. Preprint 8/10, FMA. Otto-von-Guericke-Universitat Magdeburg, 2010, 27 p.
17. Uzdemir A.P. *Dinamicheskie tselochislennye zadachi optimizatsii v ekonomike* [Dynamic integer optimization problems in economics]. Moscow: Fizmatlit, 1995, 269 p. (In Russ.).
18. Sigal I.Kh., Ivanova A.P. *Vvedenie v prikladnoe diskretnoe programmirovaniye: modeli i vychislitel'nye algoritmy* [Introduction to applied discrete programming: models and computational algorithms]. Moscow: Fizmatlit, 2007, 304 p. (In Russ.).
19. Lazarev A.A. Graphic approach to combinatorial optimization. *Automation and Remote Control*. 2007, vol. 68, no. 4, pp. 583–592.
20. Burkov V.N., Novikov D.A. *Kak upravlyat' proektami: Nauchno-prakticheskoe izdanie* [How to manage projects: Scientific and practical edition]. Moscow: SINTEG – GEO, 1997, 188 p. (In Russ.).

### Information about the authors:

*A.V. Zimin*, Cand. Sci. (Eng.), Director (iva70221@rambler.ru)

*I.V. Burkova*, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher

(irbur27@mail.ru)

*V.V. Mit'kov*, Senior Lecturer of the Chair “Automation and Information Systems” (vita-m@ngs.ru)

*V.V. Zimin*, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Automation and Information Systems” (zimin.1945@mail.ru)

Received October 13, 2018

УДК 504.064:662.74

## УПРАВЛЕНИЕ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ КОКСОХИМИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

**Киселева Т.В.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор кафедры прикладных информационных технологий и программирования (kis@siu.sibsiu.ru)

**Михайлов В.Г.<sup>2</sup>**, к.т.н., доцент кафедры производственного менеджмента (mvg.eohp@kuzstu.ru)

**Степанов И.Г.<sup>3</sup>**, д.э.н., профессор кафедры управления и сервиса (root@nkfi.ru)

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

<sup>2</sup> Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева (КузГТУ)  
(650000, Россия, Кемеровская обл., г. Кемерово, ул. Весенняя, 28)

<sup>3</sup> Новокузнецкий институт (филиал) Кемеровского государственного университета  
(654041, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Циолковского, 23)

**Аннотация.** Коксохимическое производство является высокотехнологичным процессом, оказывающим при этом все виды негативного воздействия на окружающую среду (выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, сбросы сточных вод, размещение отходов производства и потребления). Для повышения экологической безопасности необходимо исследование локальной эколого-экономической системы и ее основных элементов с целью повышения эффективности управления. В статье выполнен анализ известных подходов к определению и особенностям функционирования эколого-экономических систем промышленных предприятий и их модификаций. В результате проведенного анализа представлена система коррелированных эколого-экономических показателей, отражающих специфику эколого-экономической системы коксохимического предприятия с мононаправленной производственной программой. Наибольшее значение имеют рассмотренные зависимости «текущие затраты на охрану окружающей среды/уровень риска», «текущие затраты на охрану окружающей среды/плата за негативное воздействие на окружающую среду», «текущие затраты на охрану окружающей среды / коэффициент компенсации экономического ущерба» и «коэффициент использования производственной мощности/уровень риска». Выявлена реализация предприятием нестационарной экологической политики, дифференцированной по разным временным интервалам: с 2004 по 2010 гг. и с 2010 по 2016 гг. На основании синтеза изучения теоретических разработок отечественных и зарубежных исследователей и анализа графических зависимостей фактических данных были сформированы направления повышения эффективности управления локальной эколого-экономической системой коксохимического предприятия. С этой точки зрения большое значение имеет повышение результативности использования текущих затрат на охрану окружающей среды с помощью разработки механизма перераспределения общей суммы между отдельными унифицированными статьями расходов, а также разработка алгоритма управления отходами, образующимися на предприятии, с точки зрения их дальнейшего использования с получением товарной продукции и минимизации потенциальной платы за размещение отходов. Выполненная работа имеет практическое значение для крупных промышленных предприятий с диверсифицированным негативным воздействием на окружающую среду для подготовки принятия эффективных экологически безопасных управленческих решений.

**Ключевые слова:** коксохимическое производство, управление, эколого-экономическая система, текущие затраты, уровень риска, негативное воздействие, окружающая среда, наилучшие доступные технологии.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-818-823

Производство кокса имеет большое значение для получения качественной металлургической продукции, соответствующей лучшим международным и отечественным стандартам, в том числе с точки зрения негативного воздействия на окружающую среду (НВОС), что связано с широким спектром загрязняющих веществ и отходов [1 – 3]. Ужесточение национального экологического законодательства и международные требования мотивируют коксохимические предприятия к использованию современных инновационных технологий, которые получили название НДТ (наилучшие доступные технологии). Несмотря на активизацию данной деятельности, коксохимическое производство является потенциальным источником высоких эколого-экономических рисков, что требует повышения эффективности и диверсификации используемых методов

управления [4 – 6]. В таких условиях целесообразно исследование локальной эколого-экономической системы и ее основных элементов (предприятие – источник негативного воздействия, центр управления и окружающая среда) [7, 8].

Существует множество научных точек зрения к определению понятия эколого-экономической системы (ЭЭС) [7 – 11] и ее модификаций, адаптированных к особенностям региона или предприятия [12 – 16].

В работе [13] отмечается, что предприятие как ЭЭС – это совокупность производственных цехов, подразделений природоохранного назначения (разнородных элементов и подсистем) и взаимодействующих с ними элементов природной среды, которая в ходе совместного функционирования обеспечивает, с одной стороны, высокие экономические показатели, а с другой – сохранение экосистемных

функций. При этом производственные и природоохранные подразделения, а также природные компоненты ЭЭС выполняют различные виды деятельности, противоположные по назначению, но функционирующие в качестве единого целого. Авторы рассматривают в структуре ЭЭС промышленного предприятия экономическую подсистему (цехи, отделы и службы) и экологическую подсистему (очистные сооружения, лаборатории, отделы и службы). В результате были предложены направления управления развитием предприятия как ЭЭС.

Важное значение имеет исследование [16], где представлена структурная схема ЭЭС горнодобывающего предприятия. Авторы также показывают возможную трансформацию ЭЭС до социо-эколого-экономической системы, представляющей сложное иерархическое образование, обладающее определенной свободой формы деятельности и представляющее собой единую организационную структуру, подсистемы которой взаимосвязаны и совместно функционируют для достижения общей цели.

Изучение данной специфической ЭЭС показывает, что в условиях истощения запасов месторождений и в целях полноты использования минерально-сырьевой базы наиболее приемлемой становится интенсификация производства, включающая: снижение потерь и разубоживания; отработку ранее списанных и забалансовых запасов; повышение коэффициента извлечения полезного компонента при обогащении и др.

Авторы работы [17] выделяют основные цели воздействия для локальной ЭЭС, в качестве которой может рассматриваться промышленное предприятие:

- снижение воздействия предприятия на окружающую среду и уменьшение вероятности экологических аварий;
- снижение финансовых потерь в результате негативного воздействия на окружающую среду;
- повышение конкурентоспособности предприятия.

В этом же исследовании предложен механизм управления ЭЭС и выделены цели управления:

- минимизация разницы между объемами использования и воспроизводства ресурсов;
- максимизация качества среды обитания;
- повышение экономической эффективности;
- снижение природоемкости производства.

В исследовании [18] сформулированы термины «эффективность» и «динамизм» функционирования эколого-экономических пространственных систем различных форм территориальной организации, а также основные принципы стимулирования этого процесса:

- установление единых правил и требований по экологически обоснованному хозяйствованию, которое не приводит к резким изменениям в природно-ресурсном потенциале, а поддерживает и повышает продуктивность природных комплексов или отдельных природных объектов, облагораживает их;
- использование единых требований к хозяйственной деятельности, при которой не нарушается способ-

ность экосистем к самовоспроизводству, самоочищению и саморегулированию, сохраняется и развивается способность экосистем «производить» экологические блага и услуги;

- внедрение единых инструментов экологизации деятельности хозяйствующих субъектов в контексте устойчивого развития региона;
- воспроизводство сбалансированной системы природопользования и экологизация технологий в промышленности, энергетике, строительстве, на транспорте и других сферах экономической деятельности.

Большое значение имеет оценка влияния ЭЭС и ее разновидностей на экологическую безопасность. Работа [19] посвящена такому воздействию социоэкологической системы, где выделено ее критическое состояние (катастрофа), текущее и целевое (нормативное). Авторы показывают, что на текущее состояние социоэкологической системы влияют блоки «Инициирование опасности» (детерминированные и случайные, техногенные и природные факторы опасности) и «Защитные действия» (управляющее воздействие по ограничению опасности, включающее необходимые затраты).

Большое значение для эффективного функционирования современного предприятия как ЭЭС имеет решение проблемы отходов производства и потребления. С этой целью авторами работы [20] рассматривается классификация отходов по качественным характеристикам (легкоутилизируемые, трудноутилизируемые и не утилизируемые) и по уровню рентабельности переработки (доходные, среднедоходные, низкодоходные). Процесс отбора отходов для оценки уровня конкурентоспособности осуществляется на основе ряда предложенных показателей: органолептические, количественные показатели состава, количественные показатели свойств, опасности, энергоресурсного потенциала и экономические.

Анализ теоретических аспектов формирования и функционирования ЭЭС показывает большое значение адекватного оценивания качественных и количественных характеристик эколого-экономических рисков [21 – 23]. Один из возможных подходов определяет уровень риска (УР) как удельный вес платы за сверхнормативное НВОС в общей величине платы за НВОС:

$$УР = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \frac{\Pi_{ch_{kl}}}{\Pi_{kl}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $k$  – вид загрязняющего вещества или класс опасности отходов производства и потребления;  $l$  – элемент окружающей среды;  $K$  – общее количество видов загрязняющих веществ или классов опасности отходов производства и потребления;  $L$  – общее количество элементов окружающей среды;  $\Pi_{kl}$  и  $\Pi_{ch_{kl}}$  – соответственно общая величина платы и плата за сверхнормативное НВОС  $k$ -го вида загрязняющих веществ или класса опасности отходов производства и потребления на  $l$ -й элемент окружающей среды, млн. руб.

На рис. 1 показаны корреляционное поле и эмпирическая линия регрессии связи между текущими затратами на охрану окружающей среды и УР. Точки, представленные на всех анализируемых графиках, означают информацию, полученную по предприятию ПАО «Кокс» за календарный год, и охватывают периоды с 2004 по 2016 годы.

Данные на корреляционном поле (особенно в левой его части) имеют большой разброс, который, по-видимому, объясняется различной природоохранной политикой на предприятии. Уровень риска в левой части корреляционного поля изменяется в широком диапазоне (от 19,8 до 70,13 %) при относительно небольших изменениях текущих затрат на охрану окружающей среды (от 20,2 до 68,4 млн. руб.). Обращает на себя внимание большой разброс значений УР (от 19,8 до 52,06 %) при почти неизменных (от 65,4 до 68,4 млн. руб.) текущих затратах.

Остальные значения на графике (правая часть) охватывают период с 2010 до 2016 гг., когда существенно увеличились текущие затраты на охрану окружающей среды (от 118,3 до 212,4 млн. руб.). При таком финансировании произошло резкое снижение уровня риска, который за данные годы колебался около нуля.

Рассмотренные периоды характеризуют ситуацию изменения природоохранной политики с 2010 г. Ее изменение было связано с ужесточением экологического законодательства. В результате предприятие перешло на стандарты НДТ, обеспечивающие минимальную негативную нагрузку на окружающую среду. В рамках этого направления на предприятии функционирует система замкнутого водооборотного цикла, в результате чего с 2012 г. предприятие ПАО «Кокс» прекратило сброс сточных вод. Такая тенденция ужесточения экологического законодательства заключается в совершенствовании системы платежей за НВОС, которая направлена на дополнительное штрафование предприятий, не осуществляющих переход на стандарты НДТ.

Одним из показателей оценивания эффективности использования текущих природоохранных затрат

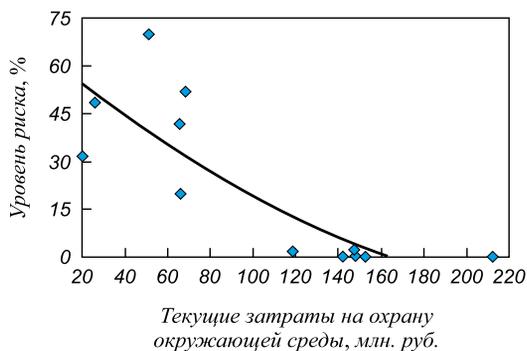


Рис. 1. Корреляционное поле и эмпирическая линия регрессии зависимости уровня риска от текущих затрат на охрану окружающей среды на предприятии ПАО «Кокс»

Fig. 1. Correlation field and empirical regression line of dependence of risk level on current costs of environmental protection at “Coke” PJSC

является уровень платы за НВОС. С этой целью на рис. 2 представлено корреляционное поле, которое показывает зависимость платы за НВОС от текущих затрат на охрану окружающей среды на предприятии ПАО «Кокс». Видно, что в левой части корреляционного поля (от 20,2 до 65,4 млн. руб. текущих затрат) наблюдается существенный разброс данных, который характеризуется недостаточно эффективной природоохранной деятельностью.

Данные рис. 2 показывают, что удержание текущих затрат примерно на одинаковом уровне (от 65,4 до 68,4 млн. руб.) приводит к относительно большому увеличению платы – от 0,36 до 0,49 млн. руб. При этом необходимо отметить, что в целом плата за негативное воздействие такого крупного и экологически опасного предприятия, как ПАО «Кокс», относительно невелика. Правая часть корреляционного поля характеризует существенное изменение в природоохранной политике предприятия, в результате чего наблюдается резкое увеличение текущих затрат на охрану окружающей среды (от 118,3 до 152,7 млн. руб.).

Следствием такой ситуации стало удержание платы за НВОС в количестве от 0,31 до 0,39 млн. руб. Как было отмечено выше, резкое увеличение текущих затрат вызвано ужесточением экологического законодательства и необходимостью функционирования в условиях стандарта НДТ, что также связано с введением в эксплуатацию замкнутого водооборотного цикла и изменением системы платежей за НВОС.

Другой подход для оценивания эколого-экономической эффективности природоохранной деятельности в рамках функционирования ЭЭС промышленного предприятия может быть связан с использованием коэффициента компенсации экономического ущерба ( $KK_{\text{эу}}$ ), который для конкретного предприятия рассчитывается по формуле

$$KK_{\text{эу}} = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \frac{\Pi_{kl}}{\text{ЭУ}_{kl}} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

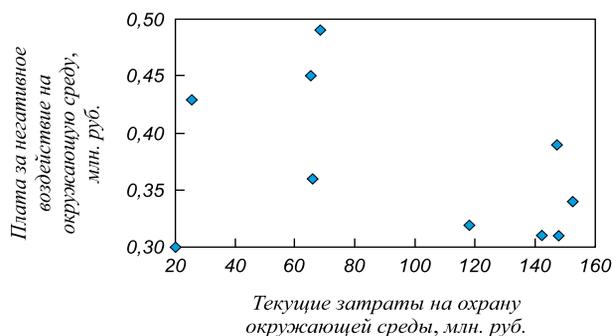


Рис. 2. Корреляционное поле зависимости платы за негативное воздействие на окружающую среду от текущих затрат на охрану окружающей среды на предприятии ПАО «Кокс»

Fig. 2. Correlation field of dependence of payment for negative environmental impact on current costs of environmental protection at “Coke” PJSC

где  $\Delta Y_{kl}$  – экономический ущерб от негативного воздействия  $k$ -го вида загрязняющего вещества или класса опасности отходов производства и потребления на  $l$ -ый элемент окружающей среды, млн. руб.

На рис. 3 приведено корреляционное поле зависимости коэффициента компенсации экономического ущерба от текущих затрат на охрану окружающей среды предприятия ПАО «Кокс». Можно предположить, что природоохранная деятельность на предприятии реализовывалась при разных условиях. Нижняя часть корреляционного поля характеризует существенное увеличение текущих затрат (от 20 до 120 млн. руб.), при котором  $KK_{\text{эу}}$  находится ниже 1 % и почти не изменяется. Верхняя часть поля также показывает, что при резком увеличении текущих затрат (от 142,6 до 213,2 млн. руб.) по сравнению с предыдущим рассматриваемым участком наблюдается значительное увеличение  $KK_{\text{эу}}$  (от 2,74 до 5,8 %). Такая ситуация объясняется, в том числе, вводом в эксплуатацию замкнутого водооборотного цикла, что привело к снижению величины экономического ущерба.

Общий анализ корреляционных полей, представленных на рис. 1 – 3, позволяет сделать вывод о достаточно низкой эффективности использования текущих затрат на охрану окружающей среды, увеличение которых должно обеспечить снижение платы за НВОС, уровень риска, а также увеличение  $KK_{\text{эу}}$ . Повышение эффективности использования данных средств может быть связано с перераспределением общей суммы затрат между отдельными статьями расходов. Механизм распределения текущих затрат на охрану окружающей среды может быть реализован различными методами, в том числе экспертным путем.

Другое направление исследования связано с анализом зависимости уровня риска от коэффициента использования производственной мощности ( $K_{\text{п.ми}}$ ) (рис. 4):

$$K_{\text{п.ми}} = \frac{Q_i}{\text{ПМ}_{\text{срг}i}} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

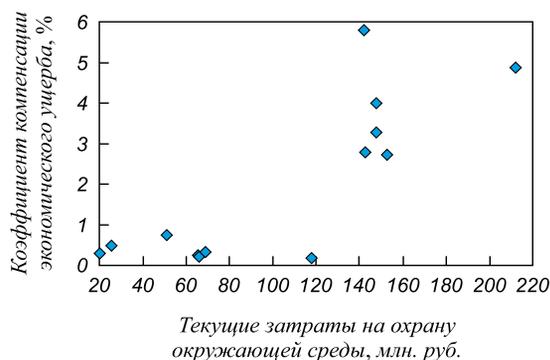


Рис. 3. Корреляционное поле зависимости коэффициента компенсации экономического ущерба от текущих затрат на охрану окружающей среды предприятия ПАО «Кокс»

Fig. 3. Correlation field of dependence of coefficient of compensation for economic damage on current costs for environmental protection of “Coke” PJSC

где  $Q_i$  – фактический объем выпуска продукции  $i$ -го вида в натуральном выражении;  $\text{ПМ}_{\text{срг}i}$  – среднегодовая производственная мощность по продукции  $i$ -го вида в натуральном выражении.

Анализ корреляционного поля на рис. 4 показывает существенное снижение уровня риска при увеличении коэффициента  $K_{\text{п.ми}}$ , причем на интервале  $K_{\text{п.ми}}$  от 86,33 до 94 % УР колеблется от нуля до 2,19 %, т.е. очень мал.

Исследование особенностей эколого-экономической системы коксохимического предприятия позволяет выделить основные направления повышения эффективности управления, минимизирующие НВОС [23 – 25]:

- тотальный переход предприятий на стандарты НДТ, обеспечивающие минимальную негативную нагрузку на окружающую среду;

- повышение эффективности использования текущих затрат на охрану окружающей среды с помощью разработки механизма перераспределения общей суммы между отдельными унифицированными статьями расходов (охрана атмосферного воздуха и предотвращение изменения климата; сбор и очистка сточных вод; обращение с отходами);

- увеличение загрузки производственных мощностей с учетом внешних рыночных условий, позволяющее снизить уровень риска;

- децентрализация функций экологического управления на предприятии до уровня цехов, участков и отдельных производственных подразделений;

- совершенствование системы управления экологическими ресурсами: нормирование, планирование, учет и анализ использования [13];

- разработка алгоритма управления отходами, образующимися на предприятии, с точки зрения их дальнейшего использования с получением товарной продукции и минимизации потенциальной платы за размещение отходов.

**Выводы.** Выполнен анализ известных подходов к определению и особенностям функционирования ЭЭС промышленных предприятий и их модификаций;

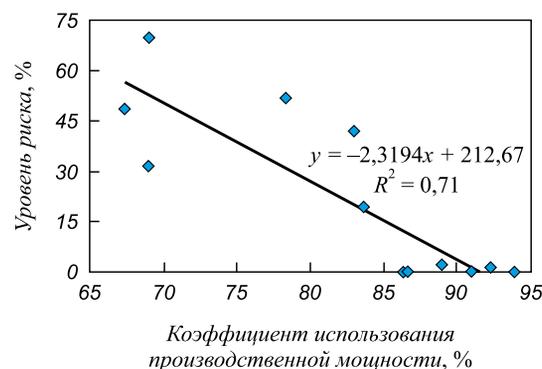


Рис. 4. Корреляционное поле зависимости уровня риска от коэффициента использования производственной мощности ПАО «Кокс»

Fig. 4. Correlation field of dependence of risk level on coefficient of production capacity use of “Coke” PJSC

предложена система эколого-экономических показателей для оценивания уровня риска и других коррелированных параметров; построены корреляционные поля наиболее значимых эколого-экономических зависимостей коксохимического предприятия; проведена интерпретация графических зависимостей с целью повышения эффективности функционирования ЭЭС коксохимического предприятия; разработаны основные направления повышения эффективности управления ЭЭС коксохимического предприятия, минимизирующие НВОС.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Zubitskii B.D., Dyakov S.N., Krasnukhin V.Y., Kozyreva S.V. Effectiveness of environmental policies at OAO Koks // *Coke and Chemistry*. 2009. Vol. 52. Iss. 5. P. 219 – 221.
- Zubitskii B.D., Ushakov G.V., Tryasunov B.G., Ushakov A.G. Reducing the atmospheric impact of wet slaking // *Coke and Chemistry*. 2009. Vol. 52. Iss. 5. P. 222 – 224.
- Shkoller M.B., Kazimirov S.A., Temlyantsev M.V., Basegskiy A.E. Conditioning of coal-enrichment waste with high moisture and ash content // *Coke and Chemistry*. 2015. Vol. 58. Iss. 12. P. 482 – 486.
- Gurman V., Baturin V. Ecological-economic model of the region: Information technology, forecasting and optimal control // *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*. 2009. Vol. 4. Iss. 5. P. 144 – 157.
- Mikhailov V.G., Kiseleva T.V., Karasev V.A., Mikhailov G.S., Skukin V.A. Development of innovative architecture of the organizational and economic mechanism for the nature protection management // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 66. Article number 012008. P. 1 – 7.
- Kiseleva T.V., Mikhailov V.G., Mikhailov G.S. Contemporary trends in improvement of organizational-economic mechanism of environmental management // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017. Vol. 84. Article number 012044. P. 1 – 6.
- Бурков В.Н., Новиков Д.А., Щепкин А.В. Механизмы управления эколого-экономическими системами. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2008. – 244 с.
- Бурков В.Н., Новиков Д.А., Щепкин А.В. Модели и механизмы управления эколого-экономическими системами // *Проблемы управления*. 2009. № 1. С. 2 – 7.
- Ugolnitskii G.A., Usov A.B. Control of complex ecological-economic systems // *Automation and Remote Control*. 2009. Vol. 70. Iss. 5. P. 897 – 906.
- Нужина И.П., Юдахина О.Б. Концептуальная модель региональной эколого-экономической системы // *Вестник Томского государственного университета. Экономика*. 2008. № 1. С. 54 – 67.
- Tretyakova E.A. Assessing sustainability of development of ecological and economic systems: A dynamic method // *Studies on Russian Economic Development*. 2014. Vol. 25. Iss. 4. P. 423 – 430.
- Burkov V.N., Burkova I.V. The principle of coordinated planning control of social and ecological-economic systems // *Game Theory and Application*. 2015. Vol. 17. P. 17 – 36.
- Елкина Л.Г., Иванова Е.Ю. Экономический механизм управления промышленным предприятием как эколого-экономической системой // *Вестник УГАТУ*. 2010. Т. 14. № 5 (40). С. 218 – 224.
- Tretyakova E.A. Evolution of research and evaluation methodology of sustainable development of social and economic system // *World Applied Sciences Journal*. 2013. Vol. 25. Iss. 5. P. 756 – 759.
- Волынкина Е.П., Кузнецов С.Н. Анализ моделей управления отходами и разработка интегрированной модели для регионального управления твердыми бытовыми отходами // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2013. № 3 (5). С. 47 – 59.
- Стровский В.Е., Косолапов О.В. Эколого-экономическая система горного предприятия: структура, взаимосвязи // *Известия Уральского государственного горного университета*. 2017. № 4 (48). С. 118 – 122.
- Баранчик В.П., Касперович С.А. Цели, инструменты и особенности управления эколого-экономическими системами в условиях устойчивого развития экономики // *Труды БГТУ. Экономика и управление*. 2011. № 7. С. 118 – 121.
- Елкина Л.Г., Косьяненко Н.Г. Пространственные эколого-экономические системы региона: теоретический аспект // *Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия экономика*. 2017. № 1 (19). С. 60 – 67.
- Анопченко Т.Ю. Роль и место управления эколого-экономическими рисками в развитии системы национальной и региональной экономики и обеспечения экологической безопасности // *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. 2007. № 12 (21). С. 62 – 67.
- Елкина Л.Г., Иванова Е.Ю., Шохова П.А. Классификация отходов по критерию эколого-экономической целесообразности их вторичного использования или утилизации // *Вестник УГАТУ*. 2012. Т. 16. № 8 (53). С. 165 – 169.
- Avdeev V.P., Burkov V.N., Kiseleva T.V. Multivariant active systems // *Automation and Remote Control*. 2001. Vol. 62. Iss. 10. P. 1645 – 1650.
- Ageev I.A., Burkov V.N., Zinchenko V.I., Kiseleva T.V. Structural analysis of the time data series // *Automation and Remote Control*. 2005. Vol. 66. Iss. 6. P. 995 – 1002.
- Mikhailov V.G., Kiseleva T.V., Bugrova S.M., Muromtseva A.K., Mikhailova Ya.S. Research of Environmental and Economic Interactions of Coke and By-Product Process // *E3S Web of Conferences*. 2017. Vol. 21. Article number 02004. P. 1 – 7.
- Степанов Ю.А., Корчагина Т.В., Дмитриев Ю.В. Модель управления состоянием экосистемы при воздействии техногенеза // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2007. № 6. С. 87, 88.
- Трушина Г.С., Щипачев М.С. Роль экологического менеджмента и менеджмента качества в природоохранной деятельности предприятий (на примере угледобывающих предприятий Кузбасса) // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013. № 2. С. 374 – 377.

Поступила 23 мая 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 10, pp. 818–823.

#### MANAGEMENT OF ECOLOGICAL-ECONOMIC SYSTEM OF COKING PLANT

T.V. Kiseleva<sup>1</sup>, V.G. Mikhailov<sup>2</sup>, I.G. Stepanov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

<sup>2</sup>Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Kemerovo, Russia

<sup>3</sup>Novokuznetsk Institute (branch) of Kemerovo State University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

**Abstract.** Coke production is a high-tech process, which at the same time has all kinds of negative environmental impacts (emissions of pollutants into the air, wastewater discharge, placement of production and

consumption waste). To improve environmental safety, it is necessary to study local ecological-economic system and its main elements in order to improve management efficiency. The article analyzes known approaches to definition and features of functioning of ecological-economic systems of industrial enterprises and their modifications. As a result of the analysis, system of correlated environmental and economic indicators is presented, reflecting specifics of ecological and economic system of coking enterprise with a monodirectional production program. The most important are the considered dependencies “current expenses for environment protection/risk level”, “current expenses for environment protection/payment for negative impact on environment”, “current expenses for environment protection/ economic damage compensation factor” and “capacity utilization/risk level”. Enterprise has identified implementation of non-stationary environmental policy, differentiated by time intervals: from 2004 to 2010 and from 2010 to 2016. Based on synthesis of theoretical studies of domestic and international researchers and analysis of graphical dependencies of actual data, directions for management efficiency improvement of local ecological-economic system of a coking plant were formed. From this point of view, it is of great importance to increase effectiveness of current expenditures provision for environment protection through development of mechanism for redistributing total amount between individual unified items of expenditures, as well as developing an algorithm for managing waste generated in the enterprise in terms of their further use to produce marketable products and minimizing potential charges for waste disposal. The work is of practical importance for large industrial enterprises with diversified negative environmental impact in order to prepare for adoption of effective environmental safety management decisions.

**Keywords:** coke production, management, ecological-economic system, current costs, risk level, negative impact, environment, best available technologies.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-10-818-823

## REFERENCES

- Zubitskii B.D., Dyakov S.N., Krasnukhin V.Y., Kozyreva S.V. Effectiveness of environmental policies at OAO Koks. *Coke and Chemistry*. 2009, vol. 52, Issue 5, pp. 219–221.
- Zubitskii B.D., Ushakov G.V., Tryasunov B.G., Ushakov A.G. Reducing the atmospheric impact of wet slaking. *Coke and Chemistry*. 2009, vol. 52, Issue 5, pp. 222–224.
- Shkoller M.B., Kazimirov S.A., Temlyantsev M.V., Basegskiy A.E. Conditioning of coal-enrichment waste with high moisture and ash content. *Coke and Chemistry*. 2015, vol. 58, Issue 12, pp. 482–486.
- Gurman V., Baturin V. Ecological-economic model of the region: Information technology, forecasting and optimal control. *Mathematical Modelling of Natural Phenomena*. 2009, vol. 4, Issue 5, pp. 144–157.
- Mikhailov V.G., Kiseleva T.V., Karasev V.A., Mikhailov G.S., Skukin V.A. Development of innovative architecture of the organizational and economic mechanism for the nature protection management. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017, vol. 66, article no. 012008, pp. 1–7.
- Kiseleva T.V., Mikhailov V.G., Mikhailov G.S. Contemporary trends in improvement of organizational-economic mechanism of environmental management. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017, vol. 84, article no. 012044, pp. 1–6.
- Burkov V.N., Novikov D.A., Shchepkin A.V. *Mekhanizmy upravleniya ekologo-ekonomicheskimi sistemami* [Control mechanisms of ecological-economic systems]. Moscow: Izdatel'stvo fiziko-matematicheskoi literatury, 2008, 244 p. (In Russ.).
- Burkov V.N., Novikov D.A., Shchepkin A.V. Models and mechanisms of management of ecological-economic systems. *Problemy upravleniya*. 2009, no. 1, pp. 2–7. (In Russ.).
- Ugolnitskii G.A., Usov A.B. Control of complex ecological-economic systems. *Automation and Remote Control*. 2009, vol. 70, Issue 5, pp. 897–906.
- Nuzhina I.P., Yudakhina O.B. Concept model of regional ecological-economic system. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika*. 2008, no. 1, pp. 54–67. (In Russ.).
- Tretyakova E.A. Assessing sustainability of development of ecological and economic systems: A dynamic method. *Studies on Russian Economic Development*. 2014, vol. 25, Issue 4, pp. 423–430.
- Burkov V.N., Burkova I.V. The principle of coordinated planning control of social and ecological-economic systems. *Game Theory and Application*. 2015, vol. 17, pp. 17–36.
- Elkina L.G., Ivanova E.Yu. Economic mechanism of management of an industrial enterprise as an ecological-economic system. *Vestnik UGATU*. 2010, vol. 14, no. 5 (40), pp. 218–224. (In Russ.).
- Tretyakova E.A. Evolution of research and evaluation methodology of sustainable development of social and economic system. *World Applied Sciences Journal*. 2013, vol. 25, Issue 5, pp. 756–759.
- Volynkina E.P., Kuznetsov S.N. Analysis of waste management models and development of integrated model for regional management of municipal solid waste. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2013, no. 3 (5), p. 47–59. (In Russ.).
- Strovskii V.E., Kosolapov O.V. Ecological-economic system of mining enterprise: structure, interrelations. *Izvestiya Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2017, no. 4 (48), pp. 118–122. (In Russ.).
- Baranchik V.P., Kasperovich S.A. Objectives, tools and features of management of ecological-economic systems in sustainable economic development. *Trudy BGTU. Ekonomika i upravlenie*. 2011, no. 7, pp. 118–121. (In Russ.).
- Elkina L.G., Kos'yanenko N.G. Spatial ecological-economic systems of the region: theoretical aspect. *Vestnik UGNTU. Nauka, obrazovanie, ekonomika. Seriya ekonomika*. 2017, no. 1(19), pp. 60–67. (In Russ.).
- Anopchenko T.Yu. Role and place of managing environmental and economic risks in development of system of national and regional economics and environmental safety. *Natsional'nye interesy: priority i bezopasnost'*. 2007, no. 12 (21), pp. 62–67. (In Russ.).
- Elkina L.G., Ivanova E.Yu., Shokhova P.A. Waste classification by the criterion of ecological-economic feasibility of their recycling or disposal. *Vestnik UGATU*. 2012, vol. 6, no. 8 (53), pp. 165–169. (In Russ.).
- Avdeev V.P., Burkov V.N., Kiseleva T.V. Multivariant active systems. *Automation and Remote Control*. 2001, vol. 62, no. 10, pp. 1645–1650.
- Ageev I.A., Burkov V.N., Zinchenko V.I., Kiseleva T.V. Structural analysis of the time data series. *Automation and Remote Control*. 2005, vol. 66, no. 6, pp. 995–1002.
- Mikhailov V.G., Kiseleva T.V., Bugrova S.M., Muromtseva A.K., Mikhailova Ya.S. Research of environmental and economic interactions of coke and by-product process. *E3S Web of Conferences*. 2017, vol. 21, article no. 02004, pp. 1–7.
- Stepanov Yu.A., Korchagina T.V., Dmitriev Yu.V. Model of ecosystem management under the influence of technogenesis. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2007, no. 6, pp. 87–88. (In Russ.).
- Trushina G.S., Shchepachev M.S. Role of environmental management and quality management in environmental activities of enterprises (using the example of Kuzbass coal mining enterprises). *Gornyy informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*. 2013, no. 2, pp. 374–377. (In Russ.).

## Information about the authors:

**T.V. Kiseleva**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Applied Information Technology and Programming (kis@siu.sibsiu.ru)

**V.G. Mikhailov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Industrial Management (mvg.eohp@kuzstu.ru)

**I.G. Stepanov**, Dr. Sci. (Economics), Professor of the Chair of Management and Services (root@nkfn.ru)

Received May 23, 2018

УДК 539.5

## МОДЕЛЬ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ, УСИЛЕННЫХ ВОЛОКНИСТЫМ ПЛАСТИКОМ

**Каледин В.О.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор, академик МАН ВШ, заведующий

*научно-исследовательской лабораторией математического моделирования (vkaled@mail.ru)*

**Тагильцев-Галета К.В.<sup>2</sup>**, к.т.н., старший преподаватель кафедры автоматизации  
и информационных систем (magister463@gmail.com)

**Ульянов А.Д.<sup>1</sup>**, аспирант, инженер научно-исследовательской лаборатории  
математического моделирования (zbrg@mail.ru)

<sup>1</sup>Новокузнецкий институт (филиал) Кемеровского государственного университета

(654041, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Циолковского, 23)

<sup>2</sup>Сибирский государственный индустриальный университет

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

**Аннотация.** Рассматривается зависимость предела прочности при растяжении углепластика со схемой армирования волокнами 45°/0/-45° от максимальной температуры нагрева. Зависимость строится согласно данным натурального эксперимента. Установлена связь между превышением температуры стеклования и пределом прочности образца. Сделан вывод о возможности построения определяющих уравнений для численного моделирования конструкций из полимерных композиционных материалов при совместных силовых и многократных температурных воздействиях, при температурах, незначительно превышающих температуру стеклования.

**Ключевые слова:** углепластик, предел прочности, растяжение, нагрев, температура стеклования, натуральный эксперимент.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-10-824-826

Волокнистые пластики, армированные высокопрочными и высокомодульными стекло-, базальто- и углеволокнами, находят широкое применение в крупногабаритных конструкциях, в машиностроении, строительстве и металлургии [1 – 3]. Однако высокотемпературные воздействия в процессе эксплуатации требуют оценки изменения физико-механических свойств вследствие температурной деградации материала.

В качестве структуры модели примем обобщенный закон Дюамеля-Неймана [4], параметры которого поддаются прямому измерению:

$$\sigma = E(T, \xi) [\varepsilon - \alpha(T, \xi)(T - T_0)], \quad (1)$$

где  $\sigma$  – механическое напряжение;  $E$  – текущий модуль упругости;  $T$  – текущая температура;  $\xi$  – степень деформации;  $\varepsilon$  – текущая деформация;  $\alpha$  – коэффициент линейного температурного расширения (КЛТР).

Разрушение наступает, когда напряжение растяжения (сжатия) вдоль армирующих волокон превышает предел прочности при растяжении  $\sigma_{\text{в}}$  или при сжатии  $\sigma_{\text{сж}}$ . Условие прочности может быть записано в виде:

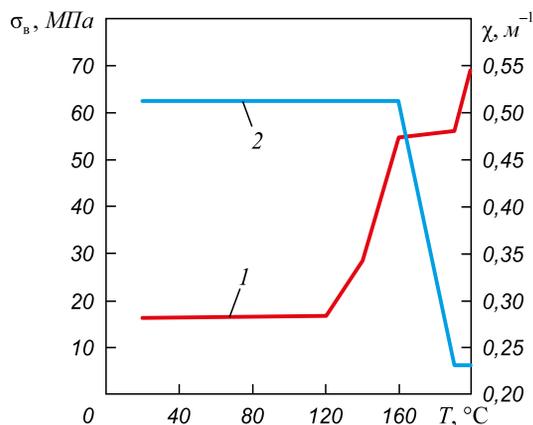
$$-\sigma_{\text{сж}}(T, \xi) \leq E(T, \xi) [\varepsilon - \alpha(T, \xi)(T - T_0)] \leq \sigma_{\text{в}}(T, \xi). \quad (2)$$

Предельные напряжения также являются функциями двух параметров  $T$  и  $\xi$ .

Особенностью волокнистых пластиков на основе терморезактивных связующих является наличие температуры  $T_c$  стеклования, при превышении которой модуль упругости и предел прочности материала КМУ-1 со схемой армирования углеродными волокнами 45°/0/-45° значительно изменяются в узком температурном диапазоне. Таким образом, для построения модели требуются экспериментальные данные о фактическом снижении модуля упругости и предела прочности после нагрева и последующего охлаждения.

Образцы подвергали нагреву до температуры от 100 до 200 °С, который приводит к появлению остаточных деформаций, увеличивающих крутку образца [5, 6]. На рисунке приведена зависимость остаточной деформации кручения и предела прочности от температуры.

Из рисунка видно, что остаточная деформация, представленная кривой 1, остается стабильной вплоть до температуры 120 °С и возрастает в 1,7 раза при достижении величины  $T_c = 160$  °С. Измеренные разрушающие напряжения имеют высокий (до 40 %) разброс, что характерно для волокнистых пластиков [7]. Зависимость предела прочности от температуры нагрева представлена на рисунке кривой 2. Существенное снижение (в 10 раз) предела прочности имело место в образцах, температура нагрева которых превышала температуру стеклования.



Зависимость остаточной деформации кручения  $\chi$  (1) и предела прочности  $\sigma_b$  (2) от температуры

Dependence of residual torsional deformation  $\chi$  (1) and tensile strength  $\sigma_b$  (2) on temperature

**Выводы.** При нагреве до температуры стеклования в углепластике на эпоксидном связующем происходят необратимые изменения: увеличиваются остаточные деформации и снижается предел прочности на растяжение. Критерием снижения предела прочности может служить рост остаточной деформации, что может быть использовано при оценке остаточной прочности конструкций после сверхпределных (аварийных) температурных воздействий, в том числе при оценке огнесохранности конструкций из полимерных композиционных материалов. Предлагаемая модель термомеханического поведения позволяет построить определяющие уравнения для численного моделирования конструкций из полимерных композиционных

материалов при совместных силовых и многократных температурных воздействиях [8], при температурах, значительно превышающих температуру стеклования. Дальнейшее увеличение температуры требует дополнительных экспериментальных исследований.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Альшиблави К.А., Ярцев В.П. Сравнительный анализ эксплуатационных свойств композитной пластиковой и металлической арматуры // *Инновации в науке*. 2017. № 6 (67). С. 78 – 81.
2. Страданченко С.Г., Масленников С.А., Прокопов А.Ю., Маштакова К.В., Махонько Я.Ю., Яковлева К.С. К вопросу об использовании полимерных материалов в строительстве подземных сооружений // *Инженерный вестник Дона*. 2015. Т. 37. № 3. С. 95.
3. Karal M. *AST Composite Wing Program – Executive Summary*. NASA/CR-20001-210650, March 2001 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20010033249.pdf> (Дата обращения: 25.05.2017 г.).
4. Работнов Ю.Н. *Механика деформируемого твердого тела: Учеб. пособие для вузов*. 2-е изд., испр. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
5. *Термомеханика полимерных материалов в условиях релаксационного перехода* / В.П. Матвеев, О.Ю. Сметанников, Н.А. Труфанов, И.Н. Шардаков. – М.: Физматлит, 2009. – 175 с.
6. Сметанников О.Ю., Труфанов Н.А. Численный анализ технологических и остаточных напряжений в стеклюющихся телах // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2008. Т. 1. № 1. С. 92 – 108.
7. Мурашов В.В., Мишуев К.С., Сорокин К.В. Оценка прочности углепластиков в монолитных конструкциях при сдвиге и сжатии методами неразрушающего контроля // *Контроль. Диагностика*. 2011. № 10. С. 29 – 34.
8. Каледин В.О., Ульянов А.Д., Каледин Вл.О. Конечный элемент сдвиговой балки Тимошенко с учетом температурных деформаций и выгорания материала // *Научн.-техн. вестник Поволжья*. 2017. № 5. С. 141 – 144.

Поступила 3 мая 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 10, pp. 824–826.

**MODEL OF THERMOMECHANICAL BEHAVIOR OF STRUCTURES REINFORCED BY FIBROUS PLASTIC**

V.O. Kaledin<sup>1</sup>, K.V. Tagil'tsev-Galet<sup>2</sup>, A.D. Ul'yannov<sup>1</sup>

**REFERENCES**

<sup>1</sup> Novokuznetsk branch of Kemerovo State University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

<sup>2</sup> Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

**Abstract.** Dependence of tensile strength of CFR with fiber reinforcement circuit 45°/0/–45° on maximum heating temperature is considered. This dependence is constructed according to the results of field experiment. The relation between excess of glass transition temperature and ultimate strength of the sample was established. It was concluded that it is possible to make equilibrium equations for numerical modeling of structures made of polymer composite materials under joint force and multiple temperature effects, at temperatures slightly higher than glass transition temperature.

**Keywords:** carbon fiber, tensile strength, stretching, heating, glass transition temperature, full-scale experiment.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-824-826

1. Al'shiblavi K.A., Yartsev V.P. Comparative analysis of operational properties of composite plastic and metal reinforcement. *Innovatsii v nauke*. 2017, no. 6 (67), pp. 78–81. (In Russ.).
2. Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A., Prokopov A.Yu., Mashtakova K.V., Makhon'ko Ya.Yu., Yakovleva K.S. On application of polymeric materials in construction of underground structures. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2015, vol. 37, no. 3, pp. 95. (In Russ.).
3. Karal M. *AST Composite Wing Program – Executive Summary*. NASA/CR-20001-210650, March 2001. Electronic resource. Available at URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20010033249.pdf> (Accessed: 25.05.2017).
4. Rabotnov Yu.N. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela: Ucheb. posobie dlya vuzov* [Mechanics of deformable solid: Manual for universities]. Moscow: Nauka, 1988, 712 p. (In Russ.).
5. Matveenko V.P., Smetannikov O.Yu., Trufanov N.A., Sharda- kov I.N. *Termomekhanika polimernykh materialov v usloviyakh*

*relaksatsionnogo perekhoda* [Thermomechanics of polymeric materials under conditions of relaxation transition]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 175 p. (In Russ.).

6. Smetannikov O.Yu., Trufanov N.A. Numerical analysis of technological and residual stresses in glass forming bodies. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred.* 2008, vol. 1, no. 1, pp. 92–108. (In Russ.).
7. Murashov V.V., Mishurov K.S., Sorokin K.V. Evaluation of strength of carbon plastics in monolith structures under shear and compression by means of non-destructive testing. *Kontrol'. Diagnostika.* 2011, no. 10, pp. 29–34. (In Russ.).
8. Kaledin V.O., Ul'yanov A.D., Kaledin V.I.O. Final element of the Timoshenko shear beam, with regard on temperature distortions and

material burnout. *Nauchn.-tekhn. vestnik Povolzh'ya.* 2017, no. 5, pp. 141–144. (In Russ.).

**Information about the authors:**

**V.O. Kaledin**, Dr. Sci (Eng), Professor, Academician of International Academy of Higher Education, Head of the Research Laboratory of Mathematical Modeling (vkaled@mail.ru)

**K.V. Tagil'tsev-Galet**, Cand. Sci. (Eng), Senior Lecturer of the Chair "Automation and Information Systems" (magister463@gmail.com)

**A.D. Ul'yannov**, Postgraduate, Engineer of the Research Laboratory of Mathematical Modeling (zbrg@mail.ru)

Received May 3, 2018

---

УДК 669.014

## ВЛИЯНИЕ ТИТАНА НА РАСТВОРИМОСТЬ КИСЛОРОДА В РАСПЛАВАХ СИСТЕМЫ Ni–Co–Cr\*

**Александров А.А.**<sup>1</sup>, к.т.н., старший научный сотрудник (a.a.aleksandrov@gmail.com)  
**Дашевский В.Я.**<sup>1,2</sup>, д.т.н., профессор кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих  
промышленных технологий, зав. лабораторией (vdashev@imet.ac.ru)

<sup>1</sup> Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН

(119334, Россия, Москва, Ленинский пр., 49)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

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

**Аннотация.** Проведен термодинамический анализ растворов кислорода в расплавах системы Ni–Co–Cr, содержащих титан. Рассчитаны зависимости растворимости кислорода в расплавах системы Ni–Co–Cr от содержания титана при 1873 К. Титан при весьма малых содержаниях практически не влияет на концентрацию кислорода в расплаве, дальнейшее повышение содержания титана приводит к весьма существенному снижению концентрации кислорода в расплаве. Определены содержания титана, при которых происходит смена механизма раскисления в исследуемых расплавах.

**Ключевые слова:** система Ni–Co–Cr, расплавы, титан, кислород, термодинамический анализ.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-10-827-831

Сплавы системы Ni–Co–Cr широко используют в современной технике [1–4]. Из всего многообразия их составов можно выделить четыре наиболее часто встречающихся состава основы сплавов: Ni – 10 % Co – 15 % Cr, Ni – 15 % Co – 10 % Cr, Ni – 20 % Co – 15 % Cr и Ni – 40 % Co – 10 % Cr. Одной из вредных примесей в этих сплавах является кислород. Для обеспечения оптимального уровня механических характеристик при производстве жаропрочных сплавов Ni–Co–Cr часто в качестве легирующего элемента используют титан [3, 4]. Для практики производства такого рода сплавов представляет значительный интерес изучение влияния титана на растворимость в них кислорода. Наличие данных о термодинамике растворов кислорода в жидких никеле и кобальте [5–7] позволяет оценить влияние титана на растворимость кислорода в расплавах системы Ni–Co–Cr.

В расплавах системы Ni–Co–Cr при содержании хрома выше 0,01–0,16 % (в зависимости от содержания кобальта) продуктом реакции взаимодействия хрома с кислородом, содержащимся в расплаве, является оксид Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [8]

$$\text{Cr}_2\text{O}_3(\text{тв}) = 2[\text{Cr}] + 3[\text{O}],$$

$$K_{\text{Cr}} = \frac{([\% \text{Cr}]f_{\text{Cr}})^2 ([\% \text{O}]f_{\text{O}})^3}{a_{\text{Cr}_2\text{O}_3}}. \quad (1)$$

Концентрацию кислорода, равновесную с заданным содержанием хрома в расплаве, для реакции (1) можно рассчитать по уравнению [8]

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr}} = \frac{1}{3} \lg K_{\text{Cr}} + \frac{1}{3} \lg a_{\text{Cr}_2\text{O}_3} - \frac{2}{3} \lg[\% \text{Cr}] -$$

$$- \left[ \frac{2}{3} e_{\text{Cr}}^{\text{Cr}} + e_{\text{O}}^{\text{Cr}} \right] [\% \text{Cr}] - \left[ e_{\text{O}}^{\text{O}} + \frac{2}{3} e_{\text{Cr}}^{\text{O}} \right] \left( \frac{K_{\text{Cr}}}{[\% \text{Cr}]^2 f_{\text{Cr}}^2} \right)^{1/3} -$$

$$- r_{\text{O}}^{\text{Cr}} [\% \text{Cr}]^2. \quad (2)$$

При раскислении расплавов Ni–Co–Cr титаном при весьма низких его содержаниях, когда хром является более сильным раскислителем, концентрацию кислорода, равновесную с заданным содержанием хрома и титана, можно рассчитать по уравнению

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr+Ti}} = \lg[\% \text{O}]_{\text{Cr}} - \left[ \frac{2}{3} e_{\text{Cr}}^{\text{Ti}} + e_{\text{O}}^{\text{Ti}} \right] [\% \text{Ti}]. \quad (3)$$

Использованные в расчетах значения констант равновесия реакций раскисления и параметров взаимодействия при 1873 К приведены в табл. 1. Величины параметров взаимодействия определяли по уравнению  $\varepsilon_{i(\text{Ni-Co})}^j = \varepsilon_{i(\text{Ni})}^j X_{\text{Ni}} + \varepsilon_{i(\text{Co})}^j X_{\text{Co}}$  [8]. С учетом значений параметров взаимодействия уравнение (3) примет вид:

для сплава Ni – 10 % Co – 15 % Cr:

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Cr+Ti}} = -1,762 + 0,469[\% \text{Ti}];$$

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-33-60138 мол\_а\_дк.

**Значения констант равновесия реакций (1) и (4) и параметров взаимодействия для расплавов системы Ni–Co–Cr при 1873 К**

*Table 1. Equilibrium constants for reactions (1) and (4), and interaction parameters for the Ni – Co – Cr melts at 1873 K*

Параметр	Значение параметра при содержании Co, %					
	0	10	15	20	40	100
$\lg K_{Cr} [8]$	-7,753	-7,764	-7,577	-7,522	-7,326	-7,029
$\lg K_{Ti} (TiO_2) [9]$	-7,581	-7,510	-7,480	-7,454	-7,391	-7,625
$\lg K_{Ti} (Ti_3O_5) [9]$	-19,621	-19,468	-19,407	-19,356	-19,262	-20,073
$\lg K_{Ti} (Ti_2O_3) [9]$	-11,597	-11,514	-11,483	-11,458	-11,427	-12,005
$e_O^O$	0 [5]	0	0	0	0	0 [5]
$e_{Cr}^{Cr}$	0,0083 [5]	0,0075	0,0071	0,0067	0,0050	0 [8]
$e_O^{Cr}$	-0,15 [8]	-0,142	-0,138	-0,134	-0,118	-0,07 [5]
$e_{Cr}^O$	-0,50 [8]	-0,474	-0,461	-0,448	-0,397	-0,24 [5]
$r_O^{Cr}$	$2,415 \cdot 10^{-3}$ [8]	$2,176 \cdot 10^{-3}$	$2,057 \cdot 10^{-3}$	$1,937 \cdot 10^{-3}$	$1,457 \cdot 10^{-3}$	0 [5]
$e_{Ti}^{Ti}$	0,080 [9]	0,078	0,078	0,077	0,074	0,064 [9]
$e_O^{Ti}$	-0,510 [6]	-0,508	-0,507	-0,506	-0,503	-0,492 [7]
$e_{Ti}^O$	-1,535 [6]	-1,530	-1,527	-1,524	-1,513	-1,479 [7]
$r_O^{Ti}$	0,036 [6]	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036 [9]
$e_{Ti}^{Cr}$	0,055 [5]	0,0539	0,0533	0,0528	0,0505	0,0438 [7]
$e_{Cr}^{Ti}$	0,060 [5]	0,0587	0,0581	0,0575	0,0549	0,0472 [7]

для сплава Ni – 15 % Co – 10 % Cr:

$$\lg[\% O]_{Cr+Ti} = -2,064 + 0,469[\% Ti];$$

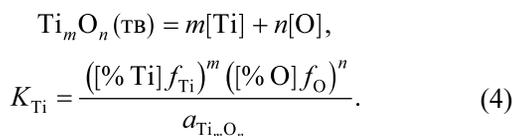
для сплава Ni – 20 % Co – 15 % Cr:

$$\lg[\% O]_{Cr+Ti} = -1,782 + 0,468[\% Ti];$$

для сплава Ni – 40 % Co – 10 % Cr:

$$\lg[\% O]_{Cr+Ti} = -2,106 + 0,466[\% Ti].$$

При раскислении расплавов Ni–Co–Cr титаном в зависимости от содержания титана продуктом реакции могут быть оксиды  $TiO_2$ ,  $Ti_3O_5$  и  $Ti_2O_3$  или в общем виде  $Ti_mO_n$ . Взаимодействие титана с кислородом при более высоких его содержаниях в расплаве, когда уже он является более сильным раскислителем, описывается реакцией



Оксиды  $TiO_2$  ( $T_{пл} = 2185 \text{ K}$  [10]),  $Ti_3O_5$  ( $T_{пл} = 2050 \text{ K}$  [10]),  $Ti_2O_3$  ( $T_{пл} = 2110 \text{ K}$  [10]) при 1873 К твердые, поэтому  $a_{TiO_2} = 1$ ,  $a_{Ti_3O_5} = 1$ ,  $a_{Ti_2O_3} = 1$ . Концентрация кислорода, равновесная с заданным содержанием титана, может быть рассчитана по уравнению

$$\lg[\% O]_{Ti+Cr} = \frac{1}{n} \left\{ \lg K_{Ti} - m \lg[\% Ti] - \right.$$

$$\left. - [me_{Ti}^{Ti} + ne_{O}^{Ti}] [\% Ti] - [me_{Ti}^{Cr} + ne_{O}^{Cr}] [\% Cr] - \right.$$

$$\left. - [ne_{O}^O + me_{Ti}^O] \left( \frac{K_{Ti}}{[\% Ti]^m f_{Ti}^m} \right)^{1/n} - \right.$$

$$\left. - nr_O^{Cr} [\% Cr]^2 - nr_O^{Ti} [\% Ti]^2 \right\}. \quad (5)$$

С учетом величины константы равновесия реакций раскисления титаном и параметров взаимодействия (табл. 1) уравнение (5) примет вид:

продукт  $TiO_2$   
 для сплава Ni – 10 % Co – 15 % Cr

$$\lg[\% O]_{Ti+Cr} = -2,518 - \frac{1}{2} \lg[\% Ti] + 0,469[\% Ti] +$$

$$+ \frac{1,344 \cdot 10^{-4}}{[\% Ti]^{1/2}} - 0,036[\% Ti]^2;$$

для сплава Ni – 15 % Co – 10 % Cr

$$\lg[\% O]_{Ti+Cr} = -2,832 - \frac{1}{2} \lg[\% Ti] + 0,468[\% Ti] +$$

$$+ \frac{1,389 \cdot 10^{-4}}{[\% Ti]^{1/2}} - 0,036[\% Ti]^2;$$

для сплава Ni – 20 % Co – 15 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Ti+Cr}} = -2,547 - \frac{1}{2} \lg[\% \text{Ti}] + 0,468[\% \text{Ti}] + \frac{1,428 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{Ti}]^{1/2}} - 0,036[\% \text{Ti}]^2;$$

для сплава Ni – 40 % Co – 10 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Ti+Cr}} = -2,912 - \frac{1}{2} \lg[\% \text{Ti}] + 0,466[\% \text{Ti}] + \frac{1,525 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{Ti}]^{1/2}} - 0,036[\% \text{Ti}]^2.$$

*Продукт Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>*  
для сплава Ni – 10 % Co – 15 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Ti+Cr}} = -2,737 - \frac{3}{5} \lg[\% \text{Ti}] + 0,461[\% \text{Ti}] + \frac{1,173 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{Ti}]^{3/5}} - 0,036[\% \text{Ti}]^2;$$

для сплава Ni – 15 % Co – 10 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Ti+Cr}} = -3,026 - \frac{3}{5} \lg[\% \text{Ti}] + 0,461[\% \text{Ti}] + \frac{1,204 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{Ti}]^{3/5}} - 0,036[\% \text{Ti}]^2;$$

для сплава Ni – 20 % Co – 15 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Ti+Cr}} = -2,771 - \frac{3}{5} \lg[\% \text{Ti}] + 0,460[\% \text{Ti}] + \frac{1,230 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{Ti}]^{3/5}} - 0,036[\% \text{Ti}]^2;$$

для сплава Ni – 40 % Co – 10 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Ti+Cr}} = -3,120 - \frac{3}{5} \lg[\% \text{Ti}] + 0,458[\% \text{Ti}] + \frac{1,275 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{Ti}]^{3/5}} - 0,036[\% \text{Ti}]^2.$$

*Продукт Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub>*  
для сплава Ni – 10 % Co – 15 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Ti+Cr}} = -2,736 - \frac{2}{3} \lg[\% \text{Ti}] + 0,456[\% \text{Ti}] + \frac{1,480 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{Ti}]^{2/3}} - 0,036[\% \text{Ti}]^2;$$

для сплава Ni – 15 % Co – 10 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Ti+Cr}} = -3,008 - \frac{2}{3} \lg[\% \text{Ti}] + 0,456[\% \text{Ti}] + \frac{1,514 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{Ti}]^{2/3}} - 0,036[\% \text{Ti}]^2;$$

для сплава Ni – 20 % Co – 15 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Ti+Cr}} = -2,772 - \frac{2}{3} \lg[\% \text{Ti}] + 0,455[\% \text{Ti}] + \frac{1,540 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{Ti}]^{2/3}} - 0,036[\% \text{Ti}]^2;$$

для сплава Ni – 40 % Co – 10 % Cr

$$\lg[\% \text{O}]_{\text{Ti+Cr}} = -3,110 - \frac{2}{3} \lg[\% \text{Ti}] + 0,454[\% \text{Ti}] + \frac{1,565 \cdot 10^{-4}}{[\% \text{Ti}]^{2/3}} - 0,036[\% \text{Ti}]^2.$$

Содержания титана в точках равновесия между оксидными фазами TiO<sub>2</sub> ↔ Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> и Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> ↔ Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> можно определить путем совместного решения уравнения (5) для смежных оксидов, пренебрегая членами с параметрами взаимодействия по причине их малых значений (табл. 2).

Решая совместно уравнения (3) и (5), можно определить содержание титана ([Ti]\*\*), при котором происходит смена механизма реакции раскисления (табл. 3).

Эти содержания находятся в концентрационном интервале, в котором продуктом раскисления является оксид Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>. Можно сделать заключение, что смена механизма реакции раскисления происходит по схеме Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ↔ Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>.

Рассчитанные равновесные концентрации кислорода в изученных расплавах при 1873 К приведены на рисунке. Титан при весьма малых содержаниях практически не влияет на концентрацию кислорода в расплаве. Дальнейшее повышение содержания титана приводит к весьма существенному снижению концентрации кислорода в расплаве.

**Выводы.** Рассчитаны зависимости растворимости кислорода в расплавах системы Ni–Co–Cr от содержания титана при 1873 К. Титан при весьма малых содержаниях практически не влияет на концентрацию

Т а б л и ц а 2

Содержания титана в точках равновесия между оксидными фазами TiO<sub>2</sub> ↔ Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> и Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> ↔ Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

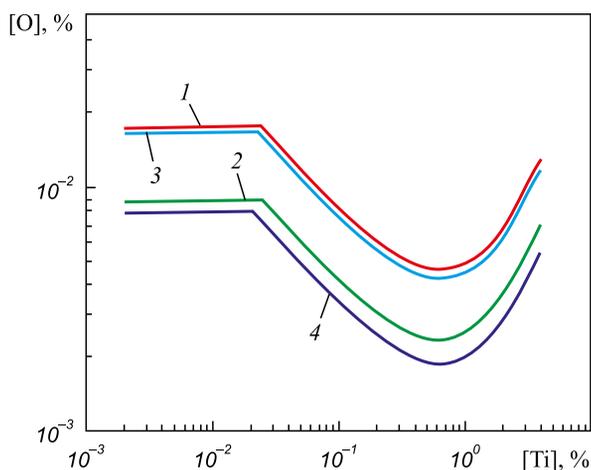
Table 2. Titanium content in the point of equilibrium between the oxide phases of TiO<sub>2</sub> ↔ Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> and Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub> ↔ Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Показатель	Значение показателя для сплава			
	Ni – 10 % Co – 15 % Cr	Ni – 15 % Co – 10 % Cr	Ni – 20 % Co – 15 % Cr	Ni – 40 % Co – 10 % Cr
[Ti]*, % (TiO <sub>2</sub> ↔ Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> )	0,64·10 <sup>-2</sup>	1,13·10 <sup>-2</sup>	0,59·10 <sup>-2</sup>	0,84·10 <sup>-2</sup>
[Ti]*, % (Ti <sub>3</sub> O <sub>5</sub> ↔ Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	1,06	1,87	0,97	1,39

Содержание титана, при котором происходит смена механизма реакции раскисления

Table 3. Titanium content at which the deoxidation reaction mechanism changes

Показатель	Значение показателя для сплава			
	Ni – 10 % Co – 15 % Cr	Ni – 15 % Co – 10 % Cr	Ni – 20 % Co – 15 % Cr	Ni – 40 % Co – 10 % Cr
[Ti]**, % ( $\text{Cr}_2\text{O}_3 \leftrightarrow \text{TiO}_2$ )	$3,08 \cdot 10^{-2}$	$2,92 \cdot 10^{-2}$	$2,95 \cdot 10^{-2}$	$2,44 \cdot 10^{-2}$
[Ti]**, % ( $\text{Cr}_2\text{O}_3 \leftrightarrow \text{Ti}_3\text{O}_5$ )	$2,37 \cdot 10^{-2}$	$2,49 \cdot 10^{-2}$	$2,25 \cdot 10^{-2}$	$2,04 \cdot 10^{-2}$
[Ti]**, % ( $\text{Cr}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ti}_2\text{O}_3$ )	$3,46 \cdot 10^{-2}$	$3,84 \cdot 10^{-2}$	$3,28 \cdot 10^{-2}$	$3,12 \cdot 10^{-2}$



Зависимость концентрации кислорода от содержания титана в расплавах Ni – 10 % Co – 15 % Cr (1), Ni – 15 % Co – 10 % Cr (2), Ni – 20 % Co – 15 % Cr (3) и Ni – 40 % Co – 10 % Cr (4) при 1873 К

Dependence of oxygen concentration on titanium content in Ni – 10 % Co – 15 % Cr (1), Ni – 15 % Co – 10 % Cr (2), Ni – 20 % Co – 15 % Cr (3) and Ni – 40 % Co – 10 % Cr (4) melts at 1873 K

кислорода в расплаве, дальнейшее повышение содержания титана приводит к весьма существенному снижению концентрации кислорода в расплаве. Определены содержания титана, при которых происходит смена механизма реакции раскисления изученных расплавов. Кривые растворимости кислорода проходят через минимум, дальнейшее повышение содержания титана приводит к повышению растворимости кислорода. Использование титана в качестве легирующего элемента при производстве сплавов системы Ni–Co–Cr

позволит получить конечный металл с весьма низкой концентрацией кислорода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Reed R.C. The Superalloys. Fundamentals and Applications. – Cambridge: University Press, 2006. – 372 p.
2. Guedou J.-Y., Augustins-Lecallier I., Naze L. et al. Development of a New Fatigue and Creep Resistant PM Nickel Base Superalloy for Disks Applications. – In book: Superalloys 2008: proceedings of 11th International Symposium on Superalloys. – Pennsylvania, USA. TMS, 2008. P. 21 – 30.
3. Gu Y.F., Cui C., Harada K. et al. Development of Ni-Co-Base Superalloys for High-Temperature Turbine Disk Applications. – In book: Superalloys 2008: proceedings of 11th International Symposium on Superalloys. – Pennsylvania, USA. TMS, 2008. P. 53 – 62.
4. Логунов А.В., Шмотин Ю.А. Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисковых газовых турбин. – М.: Наука и технологии, 2013. – 264 с.
5. Miki T. Dilute Solutions. – In book: Treatise on Process Metallurgy. Vol. 1. Process Fundamentals / Ed. Seetharaman S. – Elsevier Ltd., 2014. P. 557 – 585.
6. Janke D., Fischer W.A. Das Lösungsverhalten des Sauerstoffs in Nickelbasissschmelzen // Arch. Eisenhüttenw. 1975. B. 46. H. 5. S. 297 – 302.
7. Белянчиков Л.Н. Оценка параметров взаимодействия, коэффициентов активности и теплот растворения элементов в сплавах на основе кобальта методом пересчета с их значений в сплавах железа // Электротехнология. 2009. № 4. С. 16 – 22.
8. Александров А.А., Дашевский В.Я. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Ni–Co, содержащих хром // Металлы. 2016. № 4. С. 71 – 78.
9. Александров А.А., Дашевский В.Я. Растворимость кислорода в расплавах системы Ni – Co, содержащих титан // Металлы. 2018. № 6. С. 81 – 87.
10. Лякишев Н.П., Гасик М.И. Физикохимия и технология электроферросплавов. – М.: ЭЛИЗ, 2005. – 448 с.

Поступила 28 апреля 2018 г.

EFFECT OF TITANIUM ON OXYGEN SOLUBILITY IN Ni–Co–Cr MELTS

A.A. Aleksandrov<sup>1</sup>, V.Ya. Dashevskii<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

**Abstract.** Thermodynamic analysis of oxygen solutions in titanium-containing Ni–Co–Cr melts has been carried out. The dependences of the oxygen solubility on the content of titanium in Ni–Co–Cr melts were calculated at 1873 K. Titanium at very low levels practically does not effect on the oxygen concentration in the melt, and further increase of the titanium content leads to a very significant decrease of the oxygen

concentration in the melt. Titanium contents under which the mechanism of the deoxidation reaction changes were determined in investigated melts.

**Keywords:** Ni–Co–Cr system, melts, titanium, oxygen, thermodynamic analysis.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-10-827-831

#### REFERENCES

1. Reed R.C. *The Superalloys. Fundamentals and Applications*. Cambridge: University Press, 2006, 372 p.
2. Guedou J.-Y., Augustins-Lecallier I., Naze L. et al. Development of a new fatigue and creep resistant PM nickel base superalloy for disks applications. In: *Superalloys 2008: proceedings of 11th International Symposium on Superalloys. Pennsylvania, USA, TMS*. 2008, pp. 21–30.
3. Gu Y.F., Cui C., Harada K. et al. Development of Ni-Co-base superalloys for high-temperature turbine disk applications. In: *Superalloys 2008: proceedings of 11th International Symposium on Superalloys. Pennsylvania, USA, TMS*. 2008, pp. 53–62.
4. Logunov A.V., Shmotin Yu.A. *Sovremennye zharoprochnye nikellevye splavy dlya diskovykh gazovykh turbin* [Modern heat-resistant nickel alloys for disk gas turbines]. Moscow: Nauka i tekhnologii, 2013, 264 p. (In Russ.).
5. Miki T. Dilute solutions. In: *Treatise on Process Metallurgy. Vol. 1. Process Fundamentals*. Seetharaman S. ed. Elsevier Ltd., 2014, pp. 557–585.
6. Janke D., Fischer W.A. Das Lösungsverhalten des Sauerstoffs in Nickelbasis-schmelzen. *Arch. Eisenhüttenw.* 1975, B. 46, H. 5, S. 297–302.
7. Belyanchikov L.N. Estimation of interaction parameters, activity coefficients and heats of elements dissolution in cobalt-based alloys by the method of conversion from their values in iron alloys. *Elektrometallurgiya*. 2009, no. 4, pp. 16–22. (In Russ.).
8. Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya. Thermodynamics of the oxygen solutions in chromium-containing Ni–Co melts. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2016, no. 7, pp. 642–648.
9. Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya. Oxygen solubility in titanium-containing Ni-Co melts. *Metally*. 2018, no. 6, pp. 81–87. (In Russ.).
10. Lyakishev N.P., Gasik M.I. *Fizikokhimiya i tekhnologiya elektroferrosplavov* [Physical chemistry and technology of electroferroalloys]. Moscow: ELIZ, 2005, 448 p. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was financially supported by RFBR, research project No. 16-33-60138 mol\_a\_dk.

#### Information about the authors:

**A.A. Aleksandrov**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher  
(a.a.aleksandrov@gmail.com)

**V.Ya. Dashevskii**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, Head of the Laboratory (vdashev@imet.ac.ru)

Received April 28, 2018

Над номером работали:

Леонтьев Л.И., *главный редактор*

Протопопов Е.В., *заместитель главного редактора*

Ивани Е.А., *заместитель главного редактора*

Бащенко Л.П., *заместитель ответственного секретаря*

Потапова Е.Ю., *заместитель главного редактора по развитию*

Олендаренко Н.П., *ведущий редактор*

Запольская Е.М., *ведущий редактор*

Расенец В.В., *верстка, иллюстрации*

Кузнецов А.А., *системный администратор*

Острогорская Г.Ю., *менеджер по работе с клиентами*

---

Подписано в печать 29.10.2018. Формат 60×90 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бум. офсетная № 1.  
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,75. Заказ 8566. Цена свободная.

---

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

# IZVESTIYA

## FERROUS METALLURGY

STUDY OF THE INTERRELATIONS OF BLOWING PARAMETERS, OPTIONS OF ELECTRIC INFLUENCE AND NATURE OF LIQUID SPRAYING BY PHYSICAL MODELING

BENEFITS AND RISKS OF BLAST FURNACES WITH HIGH INTENSITY

EVALUATION OF UNEVEN DISTRIBUTION OF CHARGE MATERIALS AT BLAST FURNACE

STRUCTURE AND PROPERTIES OF 17G1S-U LOW-CARBON PIPE STEEL MICROALLOYED BY BORON

WEAR OF SINTERED COMPOSITES BASED ON BEARING STEEL AT BOUNDARY FRICTION WITH CURRENT COLLECTION AGAINST COPPER

HARDENING MECHANISMS OF STEELS WITH BAINITE AND MARTENSITE STRUCTURES AT COMPRESSIVE DEFORMATION

THERMODYNAMIC MODELING OF NICKEL AND IRON REDUCTION FROM MULTICOMPONENT SILICATE MELT IN BUBBLING PROCESS. REPORT 2. REDUCING AGENT – A MIXTURE OF  $H_2 - H_2O$

SYNTHESIS OF FINELY DISPERSED CHROMIUM DIBORIDE FROM NANOFIBROUS CARBON

SOCIALLY ORIENTED INFORMATION TECHNOLOGY OF INCREASING THE LEVEL OF ECOLOGICAL SAFETY OF MINING AND METALLURGICAL AREA

DEVELOPMENT OF TRAINING PROGRAMS FOR USERS OF ENTERPRISE RESOURCE PLANNING SYSTEM

MANAGEMENT OF ECOLOGICAL-ECONOMIC SYSTEM OF COKING PLANT

MODEL OF THERMOMECHANICAL BEHAVIOR OF STRUCTURES REINFORCED BY FIBROUS PLASTIC

EFFECT OF TITANIUM ON OXYGEN SOLUBILITY IN Ni-Co-Cr MELTS