

# ИЗВЕСТИЯ

## ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

### ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 61 Номер 12 2018

#### • МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Совершенствование динамического режима прокатки для повышения стойкости валков шаропрокатного стана

Изучение процесса прямого легирования стали марганцем в условиях современного электросталеплавильного производства

Исследование степени окисления хрома в оксидно-фторидных шлаках, применяемых при электрошлаковом переплаве

#### • МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Особенности изменения структуры и свойств твердофазного соединения сплава ОТ4-1, полученного холодной тугой посадкой и последующей термической обработкой

Влияние деформации на скорость миграции границ наклона в никеле

#### • ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Термодинамическое моделирование восстановления никеля и железа из многокомпонентного силикатного расплава в процессе барботажа. Сообщение 3. Восстановитель – конвертированный газ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

# ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

---

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

---

№ 12, 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)

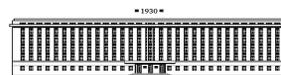
ЮРЬЕВ А.Б. (АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк)

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

- Рубцов В.Ю., Шевченко О.И., Миронова М.В. Совершенствование динамического режима прокатки для повышения стойкости валков шаропрокатного стана ..... 927
- Дмитриенко А.В., Протопопов Е.В., Дмитриенко В.И., Якушевич Н.Ф., Горюшкин В.Ф. Изучение процесса прямого легирования стали марганцем в условиях современного электросталеплавильного производства ..... 933
- Быстров В.А. Эффективность упрочнения твердым сплавом сменных деталей металлургических агрегатов ..... 939
- Левков Л.Я., Шурыгин Д.А., Дуб В.С., Клочай В.В., Корзун Е.Л. Исследование степени окисления хрома в оксидно-фторидных шлаках, применяемых при электрошлаковом переплаве ... 948

### 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 3. Восстановитель – конвертированный газ ..... 957

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Бахматов П.В., Муравьев В.И., Фролов А.В., Пицык В.С. Особенности изменения структуры и свойств твердофазного соединения сплава ОТ4-1, полученного холодной тугой посадкой и последующей термической обработкой ..... 963
- Поletaев Г.М., Зоря И.В., Ракитин Р.Ю., Коханенко Д.В., Старостенков М.Д. Влияние деформации на скорость миграции границ наклона в никеле ..... 974

### ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

- Сахаров Д.Ф., Витушкин А.В. Силовой анализ процесса дробления в конусной дробильной машине ..... 980

### ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

- Беланов И.П., Наумова Н.Б., Семина И.С., Савенков О.А. Шлаки металлургического производства – перспективный материал для рекультивации техногенных отходов ..... 987

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Заякин О.В., Салина В.А., Жучков В.И. Термодинамическая оценка влияния температуры на восстановление элементов из хромосодержащего рудно-известкового расплава ..... 993
- Орлов Г.А., Шестакова Е.Н. Оценка деформируемости высокоуглеродистой стали при ковке ..... 995
- Указатель статей, помещенных в 2018 г. .... 997

## CONTENTS

### METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- V.Yu. Rubtsov, O.I. Shevchenko, M.V. Mironova Improving dynamic regime of rolling for increasing durability of ball-rolling mill rolls .. 927
- A.V. Dmitrienko, E.V. Protopopov, V.I. Dmitrienko, N.F. Yakushevich, V.F. Goryushkin Direct steel alloying by manganese under recent conditions of electric steel-making ..... 933
- V.A. Bystrov Efficiency of hardening of metallurgical equipment spare parts by hard alloy ..... 939
- L.Ya. Levkov, D.A. Shurygin, V.S. Dub, V.V. Klochai, E.L. Korzun Study of the oxidation degree of chromium in oxide-fluoride slags for ESR ..... 948

### 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 3. Converted gas as a reducing agent ..... 957

### MATERIAL SCIENCE

- P.V. Bakhmatov, V.I. Murav'ev, A.V. Frolov, V.S. Pitsyk Peculiarities of change in structure and properties of solid-phase compound of OT4-1 alloy obtained by cold forced fit and further thermal treatment ..... 963
- G.M. Poletaev, I.V. Zorya, R.Y. Rakitin, D.V. Kokhanenko, M.D. Starostenkov Effect of deformation on migration rate of grain boundaries in nickel ..... 974

### INNOVATIONS IN METALLURGICAL INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES AND MATERIALS

- D.F. Sakharov, A.V. Vitushkin Power analysis of the crushing process in a cone crusher ..... 980

### ECOLOGY AND RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES

- I.P. Belanov, N.B. Naumova, I.S. Semina, O.A. Savenkov Metallurgical production slags – promising material for technological waste reclamation ..... 987

### SHORT REPORTS

- O.V. Zayakin, V.A. Salina, V.I. Zhuchkov Influence of temperature on the elements reduction from chromium-containing ore-lime melt .. 993
- G.A. Orlov, E.N. Shestakova Estimation of deformability of high-carbon steel under forging ..... 995
- Index of articles "Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy" for 2018. Vol. 61 ..... 997

УДК 621.771.06.005

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПРОКАТКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ ВАЛКОВ ШАРОПРОКАТНОГО СТАНА

*Рубцов В.Ю., аспирант кафедры металлургических технологий (Urylot@mail.ru)*

*Шевченко О.И., д.т.н., заведующий кафедрой металлургических  
технологий (Shevchenko.Oleg@mail.ru)*

*Миронова М.В., к.т.н., директор департамента Нижнетагильского технологического  
института (филиал) (blastpurnace@mail.ru)*

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

**Аннотация.** Одной из существенных причин простоев шаропрокатных станов является замена валков в связи с их износом. В статье исследованы степень и зоны критического износа шаропрокатных валков, где наибольший износ наблюдается по ребордам в зоне захвата заготовки. Аналитически определены условия, необходимые для захвата заготовки и выполнения процесса прокатки. В качестве прогрессивной технологии предложен способ переменной частоты вращения валков при подаче заготовки, представлены результаты испытаний при ее изменении по линейному и квадратичному законам. Преобразованы известные формулы для определения средней скорости деформации при изменении частоты вращения валков при линейной и квадратичной зависимостям. Проведены экспериментальные исследования в условиях шаропрокатного стана АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат» при прокатке шара диам. 60 мм из стали марки ШЗГ на стане прокатки мелющих шаров 40-80. Проведены опыты с изменением частоты вращения валков в ручном режиме по заданным параметрам при захвате заготовки валками, которые показали существенное влияние изменения частоты вращения на среднее удельное давление в момент захвата заготовки. Представлены моментно-временная характеристика и характеристика среднего контактного давления для расчетных и опытных данных, а также эмпирические характеристики при переменной частоте вращения валков по линейному и по квадратичному законам. Определена допустимая сходимости результатов расчетных и эмпирических характеристик. Предложено инженерное решение для поставленной задачи в качестве установки тиристорного преобразователя, которое позволит уменьшать частоту вращения валков перед захватом, а после захвата заготовки увеличивать ее до номинальной по заданному закону. Так можно получить равномерное распределение среднего контактного давления по всей длине валка при различных режимах работы стана в автоматическом режиме. Применение такой методики позволит уменьшить степень износа прокатного инструмента при той же производительности шаропрокатного стана, тем самым снизить расход валков и количество перевалок по их износу.

**Ключевые слова:** винтовой калибр, реборда, захват заготовки, условие вращения заготовки, усилие прокатки, среднее контактное давление, частота вращения, линейный закон, квадратичный закон.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-927-932

### ВВЕДЕНИЕ

При производстве шаров на шаропрокатном стане деформация металла осуществляется в валках с винтовыми калибрами. Заготовка подается между валками, которые вращаются в одном направлении и расположены под определенными углами друг относительно друга. В это время происходит захват заготовки ребордами валка. После прохода через калибр заготовка постепенно обжимается и приобретает форму шаров, которые на последней реборде отделяются друг от друга путем удаления перемычки. Очаг деформации разделяют на формирующий участок, где происходит захват заготовки, ее обжатие и формирование шара, и отделочный участок, где происходит обкатка шара [1 – 6].

Наиболее изнашиваемыми элементами из всего оборудования стана являются прокатные валки, периодическая замена которых по сроку износа приводит к значительным простоям. Большое влияние на износо-

стойкость валков, помимо качества их изготовления, связанного с выбором материала и технологии производства, оказывают условия эксплуатации [7]. Анализ причин выхода из строя прокатного инструмента показал, что износ происходит за счет заката или разрушения реборд, что особенно наблюдается на первой реборде при заходе в клеть, т.е. на формирующем участке, в то время как отделочный участок еще сохраняет необходимую геометрию (рис. 1).

Для процесса прокатки необходимо выполнение условий осевого перемещения и вращения заготовки в момент ее захвата. При критическом износе реборды на заходной части валка появляются пробуксовка и отсутствие вращения заготовки, что приводит к образованию «реек» и в дальнейшем является сигналом для замены валков. Поэтому использовать валки в процессе прокатки можно до определенной степени их износа [8]. В настоящее время отсутствуют критерии определения критического износа валков шаропрокатных



Рис. 1. Характер износа реборд валка

Fig. 1. Wear pattern of roll flanges

станов, и чаще всего ресурс валков ограничивается тоннами прокатанного металла. В связи с этим совершенствование режима прокатки в момент захвата заготовки является актуальной задачей.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования проводились на стане прокатки мелющих шаров 40-80 [9] АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат» с подачей заготовки диам. 60 мм из стали марки ШЗГ при температуре нагрева под прокатку 930 °С. Бочки шаропрокатных валков изготовлены из горячекованной заготовки стали марки 5ХНМ, твердость рабочей поверхности валка 42 – 48 HRC. Диаметр шаропрокатного валка 460 мм, длина бочки валка 400 мм. Опытным режимам предшествовали аналитические расчеты энергосиловых параметров по известным методикам [4, 10 – 24].

### АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Усилие, необходимое для выполнения условия осевого перемещения заготовки, незначительно, поэтому

пренебрегая им, оценим усилие прокатки исходя из условия вращения заготовки в общем виде [4]:

$$M_T - M_N - M_p - M_I \geq 0, \tag{1}$$

где  $M_T$  – момент вращения заготовки или момент равнодействующей силы трения, Н·м;  $M_N$  – момент сопротивления вращению заготовки равнодействующей силы нормального давления, Н·м;  $M_p$  – момент сопротивления сил трения, возбуждаемый на заднем торце заготовки внешним осевым усилием и силами инерции движущихся частей задающего устройства, Н·м;  $M_I$  – момент сил инерции заготовки относительно ее оси, Н·м.

Подставляем все известные параметры для нахождения каждого из моментов и преобразуем уравнение (1) в следующий вид:

$$r\mu Nm_T - \frac{1}{2}(1+i)N \frac{\xi_c}{r} - \frac{2}{3}\pi p_{ш} f \rho_0^3 - \frac{r^2}{2} G \Omega \geq 0, \tag{2}$$

где  $r$  – радиус заготовки, м;  $\mu$  – коэффициент трения при вращении заготовки;  $N$  – нормальное давление (усилие прокатки), Н;  $m_T$  – проекция единичного вектора для равнодействующей силы трения;  $i$  – отношение радиуса заготовки и рабочего радиуса валка;  $\xi_c$  – угол захвата заготовки;  $p_{ш}$  – нормальное контактное напряжение на торце штанги с заготовкой, Па;  $f$  – коэффициент внешнего трения;  $\rho_0^3$  – текущее значение радиуса задающей штанги, м;  $G$  – масса заготовки, кг;  $\Omega$  – угловое ускорение заготовки, рад/с<sup>2</sup>.

Исходя из выражения (2) нормальное давление  $N$  для условия вращения заготовки примет вид

$$N \geq \frac{\frac{2}{3}\pi p_{ш} f \rho_0^3 + \frac{r^2}{2} G \Omega}{r\mu m_T - \frac{1}{2}(1+i)\xi_c r}. \tag{3}$$

Наиболее существенное влияние на расчетное значение усилия прокатки  $N$  по формуле (3) оказывает угловое ускорение заготовки  $\Omega$  ввиду того, что заготовка начинает вращение из состояния покоя с максимальной

### Значения энергосиловых параметров

#### Values of power parameters

Расчетный параметр	Значение параметра при положении заготовки в калибре		
	момент захвата заготовки	после 1 оборота валка	полное заполнение калибра
Площадь контакта $F$ , м <sup>2</sup>	0,00008	0,001598	0,00601
Средняя скорость деформации $v_{ср}$ , м/с	0,99	1,09	0,91
Степень деформации, %	28,4	25,11	26,55
Среднее контактное давление $p$ , МПа	159,9	74,8	41,0
Полное усилие прокатки $N$ , кН	12,8	119,5	246,0
Крутящий момент на валках $M$ , Н·м	1181	11113	22878

ным ускорением при ее контакте с валками. Расчетное значение усилия прокатки, создаваемое в начальный период при заходе в клеть, определяется соотношением  $N \geq 12\,793$  Н. Среднее контактное давление составляет 159,9 МПа с учетом площади соприкосновения металла с валком

$$F = \int_s^H b_x dx, \quad (4)$$

где  $F$  определяется на каждом витке как сумма  $F_{ab}$  и  $F_{bB_1}$  (рис. 2);  $b_x$  – условная ширина контакта металла с валком, м;  $S, H$  – параметры подачи заготовки, м.

Начало процесса прокатки характеризуется захватом заготовки. После одного оборота валка меняется характер обжатия. Участок  $ab$ , на котором из цилиндрической заготовки длиной  $S$  формируется сфера, и участок  $bB_1$ , где из сферы большего диаметра формируется сфера меньшего диаметра, начинают перестраиваться, а после полного объединения в одну единую линию  $aB_2$  начинается работа калибрующего участка валка, где калибр уже заполняется и имеет максимальное значение усилий. Поэтому в качестве основных трех положений заготовки в калибре для дальнейших расчетов выбира-

ем момент захвата заготовки, состояние после одного оборота валка и стадию полного заполнения калибра.

Проводим расчет нормального давления при захвате заготовки по формуле (3), остальные энергосиловые параметры определяем по методу А.И. Целикова [14, 15] для трех положений заготовки в калибре.

**РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИТИЧЕСКОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ**

По значениям энергосиловых параметров, а также по опытными данным, полученным в процессе экспериментальных прокаток, построили моментно-временные зависимости и зависимости среднего контактного давления (рис. 3). Анализ расчетных и экспериментальных значений характеристик показал их совпадение с высокой степенью подобия. Имеющиеся расхождения объясняются эксплуатационным падением мощности двигателя привода клетки, а также износом оборудования и валков, следовательно, низким КПД стана, что при устоявшемся процессе составляет не более 22 %, а в момент захвата достигает 38 %. Это возможно объяснить различием между теоретической и фактической площадью контакта в зоне захвата.

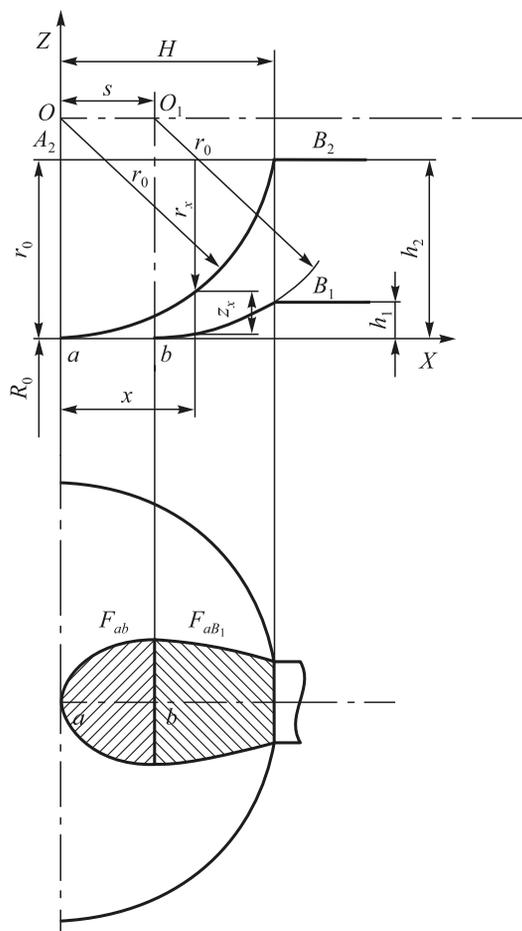


Рис. 2. Схема обжатия

Fig. 2. Compression scheme

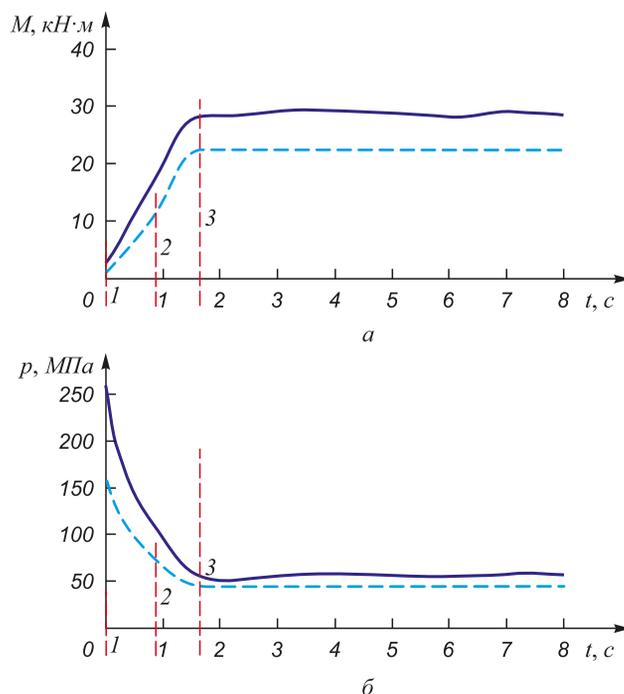


Рис. 3. Моментно-временная характеристика (а) и характеристика среднего контактного давления (б) для расчетных (---) и опытных (—) данных: 1 – момент захвата заготовки; 2 – после 1 оборота валка; 3 – полное заполнение калибра

Fig. 3. Torque-time characteristics (a) and characteristics of average contact pressure (b) for calculated (---) and experimental (—) data: 1 – the moment of blank capture; 2 – after 1 turn of the roll; 3 – full caliber

Из приведенных на рис. 3 характеристик видно, что максимальное давление создается в момент захвата, что, очевидно, приводит к значительному износу и быстрому разрушению реборды первого витка калибра на формирующем участке.

Для повышения ресурса работы прокатного инструмента предложены экспериментальные режимы прокатки, предусматривающие замедление вращения валков в два раза перед попаданием в них заготовки, а после получения вращения – повышение частоты вращения до номинальной. При этом давление во время захвата не превышает максимального. Расчеты показывают: нормальное давление для условия вращения заготовки составляет  $N \geq 3529$  Н: это в 3,5 раза меньше, чем давление по базовым режимам.

Экспериментальные режимы деформации предусматривают линейное и квадратичное приращение угловой скорости. Результаты в виде графического изображения характеристик приведены на рис. 4: среднее давление при захвате заготовки не превышает максимального при полном заполнении калибра. Причем, при расчете энергосиловых параметров использовалась формула А.И. Целикова для определения средней скорости деформации, справедливая при постоянной частоте вращения валков:

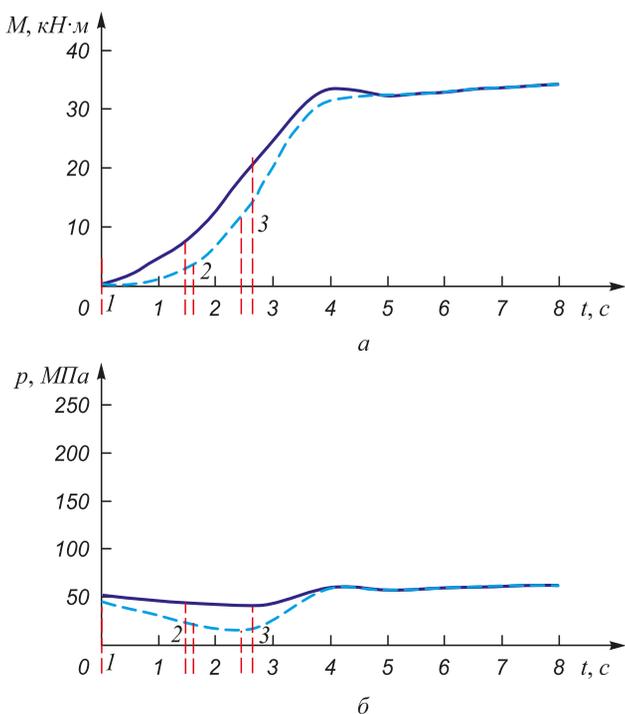


Рис. 4. Эмпирические характеристики при переменной частоте вращения валков по линейному (—) и по квадратичному (---) законам:

1 – момент захвата заготовки; 2 – после 1 оборота валка; 3 – полное заполнение калибра

Fig. 4. Empirical characteristics of variable roll speed for linear (—) and square (---) law:

1 – the moment of blank capture; 2 – after 1 turn of the roll; 3 – full caliber

$$v_{cp} = \frac{1}{b} \int_0^b v_x dx. \tag{5}$$

Для переменной частоты вращения по линейному закону формулу (5) преобразуем в следующий вид:

$$v_{cp} = \frac{1}{b} \int_0^b dx \int_{n_{в.захв}}^{n_{в.раб}} \frac{\pi y}{30} \frac{A_0 - \rho}{\rho} \frac{x}{\sqrt{r_1^2 + x^2}} dy. \tag{6}$$

Для переменной частоты вращения по квадратичному закону формула (5) приобретает вид

$$v_{cp} = \frac{1}{bn_{в}} \int_0^b dx \int_{n_{в.захв}}^{n_{в.раб}} \frac{\pi y^2}{30} \frac{A_0 - \rho}{\rho} \frac{x}{\sqrt{r_1^2 + x^2}} dy; \tag{7}$$

здесь  $n_{в.захв}$  и  $n_{в.раб}$  – частота вращения валков в момент захвата и частота вращения валков рабочая;  $n_{в}$  – номинальная частота вращения валков (при данном условии равна рабочей);  $b$  – приведенная ширина реборды в зоне захвата;  $A_0$  – межосевое расстояние валка и заготовки.

Квадратичный закон изменения частоты вращения можно применять для условий, когда время пауз между заготовками ограничено, что позволяет сократить время достижения номинальной частоты вращения до 2 с при том же эффекте.

Как было исследовано, для шаропркатных станов скорость деформации может достигать 2 м/с, в настоящее время лимитирующим фактором для станов является лишь условие захвата, поэтому скорость деформации составляет в среднем 1 м/с. Решив задачу по условию захвата, возможно будет увеличить рабочую частоту вращения валков, при этом, соблюдая условие захвата, описанное в настоящей работе, возможно будет достигнуть равномерного износа валков по всей длине. При этом незначительное уменьшение частоты вращения на захвате (в течение 4 – 6 с) и увеличение частоты вращения валков после захвата в процессе прокатки (прокатка одной заготовки составляет 40 – 80 с в зависимости от ее длины) дадут возможность значительно увеличить производительность шаропркатного стана, одновременно с этим увеличить ресурс валков и, как следствие, уменьшить количество перевалок по износу. В настоящее время стойкость валков для шаров диам. 60 мм составляет 800 – 900 т прокатанного металла, что при часовой производительности 7 т/ч требует перевалок по износу каждые 5 суток.

Техническое решение данной задачи возможно реализовать установкой тиристорного преобразователя с автоматической регулировкой частоты вращения валков.

### Выводы

Результаты расчетного метода и его экспериментальная проверка в производственных условиях позволили

установить причины износа и разрушения реборд прокатных валков на формирующем участке в момент захвата заготовки. Уменьшение частоты вращения валков перед подачей заготовки в клеть, а после захвата ее увеличение до номинальных значений приводят к снижению усилия прокатки и равномерному распределению среднего контактного давления по всей длине валка. Результаты расчетного метода имеют удовлетворительную сходимость с данными апробации в промышленных условиях и могут быть использованы на практике. Управление частотой вращения при подаче заготовки в клеть увеличивает срок службы прокатного инструмента и в целом приводит к значительному сокращению времени простоев стана, а также дает возможность увеличения производительности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Котенок В.И. Развитие теории формообразования профилей в винтовых калибрах и создание высокоэффективных процессов и оборудования для прокатки деталей машин: Автореф. дис. д-ра техн. наук. – М., 2005. – 37 с.
2. Артес А.Э., Третьохин В.В. Проблема совершенствования производства мельющих шаров. Качество и инновации // Компетентность. 2014. № 3 (114). С. 50 – 53.
3. Скобло Т.С., Автухов А.К., Климанчук В.В. Причины и характеристика отказов прокатных валков станов горячей прокатки // *Металлургия машиностроения*. 2014. Т. 3. С. 14 – 17.
4. Тетерин П.К. Теория поперечной и винтовой прокатки. – М: *Металлургия*, 1983. – 270 с.
5. Быстров В.А., Дьяков П.К., Уманец А.Г. Условия эксплуатации и износ валков прокатного стана горячего металла // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2014. № 5. С. 24 – 29.
6. Синнаве М. Новые марки прокатных валков и тенденции их производства // *Сталь*. 2003. № 7. С. 48 – 52.
7. Романцев Б.А., Алещенко А.С., Цюцюра В.Ю., Лубе И.И. Особенности износа рабочих валков прошивного стана ТПА 159-426 при прокатке непрерывнолитых заготовок большого диаметра // *Производство проката*. 2016. № 6. С. 20 – 27.
8. Романцев Б.А., Алещенко А.С., Цюцюра В.Ю., Тыщук И.Н., Лубе И.И. Особенности износа рабочих валков прошивного стана ТПА 50-200 при прокатке непрерывнолитых и горячекатаных заготовок // *Металлург*. 2016. № 10. С. 57 – 61.
9. Стан ЦКБММ 44 для прокатки шаров 40-80. Технический проект. – М.: ЦНИИТМАШ, 1955.
10. Перетятко В.Н., Климов А.С., Филиппова М.В. Калибровка валков шаропркатного стана. Сообщение 1 // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2013. № 4. С. 27 – 30.
11. Филиппова М.В., Сметанин С.В., Перетятко В.Н. Компьютерное моделирование прокатки шаров в винтовых калибрах. – В кн.: *Моделирование и наукоемкие информационные технологии в технических и социально-экономических системах. Труды IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2016. С. 290 – 294.
12. Филиппова М.В., Перетятко В.Н., Сметанин С.В. Усилия и напряжения при прокатке шара. // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 8. С. 587, 588.
13. Целиков А.И., Барбарич М.В. Специальные прокатные станы. – М: *Металлургия*, 1971. – 336 с.
14. Целиков А.И. Теория расчета усилий в прокатных станах. – М: *Металлургия*, 1962. – 496 с.
15. Грудеев А.П. Внешнее трение при прокатке. – М: *Металлургия*, 1973. – 228 с.
16. Гуляев Ю.Г., Шифрин Е.И., Лубе И.И., Гармашев Д.Ю., Николаенко Ю.Н. Определение геометрических параметров очага деформации в станах поперечно-винтовой прокатки // *Сталь*. 2013. № 11. С. 53 – 55.
17. Красневский С.М., Макушок Е.М., Щукин В.Я. Разрушение металлов при пластической деформации. – Минск: *Наука и техника*, 1983. – 173 с.
18. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М: *Машиностроение*; София: *Техника*, 1980. – 304 с.
19. Белов В.И., Разгулин И.А. Оценка средних значений степени и скорости деформации с применением программного комплекса Deform 3D при горячей прокатке // *Моделирование и развитие процессов ОМД*. 2014. № 20. С. 153 – 157.
20. Перетятко В.Н., Климов А.С., Филиппова М.В., Федоров А.А. Калибровка валков шаропркатного стана. – В кн.: *Металлургия, технология, управление, инновации, качество*. Сб. науч. тр. СибГИУ. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2010. С. 258 – 265.
21. Pater Zbigniew. Analysis of helical rolling process of balls formed from a head of a scrapper rail // *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2016. Vol. 10. No. 30. P. 110 – 114.
22. Pater Z., Tomczak J., Bartnicki J., Lovell M.R., Menezes P.L. Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2013. Vol. 67. P.1 – 7.
23. Chila P., Pater Z., Tomczak J., Chila P. Numerical analysis of rolling process for producing steel balls using helical rolls. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2016. Vol. 61. No. 2. P. 485 – 492.
24. Pater Z. FEM analysis of the multi-wedge helical rolling process for a workholding bolt. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 80. P. 130, 131.

Поступила 22 мая 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 12, pp. 927-932.

### IMPROVING DYNAMIC REGIME OF ROLLING FOR INCREASING DURABILITY OF BALL-ROLLING MILL ROLLS

*V.Yu. Rubtsov, O.I. Shevchenko, M.V. Mironova*

Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** One of the important reasons for the downtime of ball rolling mills is replacement of rolls due to their wear and tear. The degree and zones of critical wear of ball rolling rolls are investigated in the article, where the greatest wear is observed over the flanges in zone of

billet capture. Conditions necessary to capture the blank and to perform rolling process are analytically determined. Variable frequency method of roll rotations is proposed as a progressive technology for blank supply. The results of tests for its variations in accordance with linear and quadratic law are presented. Known formulas determining average strain rate at rolls rotational speed change are converted for linear and quadratic dependences. Experimental studies have been carried out in conditions of EVRAZ Nizhnetagilsky Metallurgical Plant ball rolling mills during rolling of 60mm ball made of Sh-3G steel. Ex-

periments were performed for given parameters of manual change in rolls rotation speed at blank capture by rollers. The results have shown a significant effect of change in rotational speed on average specific pressure during blank capture. Evaluation of torque-time and average contact pressure for calculated and experimental data are presented. Empirical characteristics are also described at variable rotational speed of rolls according to linear and quadratic law. Acceptable convergence of results of calculated and empirical characteristics is determined. Engineering solution has been proposed for that task. It consists in installation of a thyristor converter. This solution allows reduction of rolls speed before blank capture. Also, this solution will increase frequency to the nominal value according to the given law after blank capture. As an obtained result, there is uniform distribution of average contact pressure over the entire length of the roll under different operating conditions of mill in automatic mode. Application of this technique will reduce wear degree of the rolling tool. At the same time, productivity of ball rolling mill will be maintained. Rolls consumption and number of rolls change will decrease due to rolls wear.

**Keywords:** screw gauge, flange, blank capture, blank rotation condition, rolling force, mean contact pressure, speed, linear law, square law.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-12-927-932

## REFERENCES

1. Kotenok V.I. *Razvitie teorii formoobrazovaniya profilei v vintovykh kalibrakh i sozdanie vysokoeffektivnykh protsessov i oborudovaniya dlya prokatki detalei mashin: Avto-ref. dis... doktora tekhn. nauk* [Development of theory of profiles forming in helical roll passes and creation of high effective processes and equipment for rolling of machines parts: Extended Abstract of Dr. Sci. Diss.]. Moscow, 2005, 37 p. (In Russ.).
2. Artes A.E., Tret'yukhin V.V. Enhancement of grinding balls production. Quality and innovations. *Kompetentnost'*. 2014, no. 3 (114), pp. 50–53. (In Russ.).
3. Skoblo T.S., Avtukhov A.K., Klimanchuk V.V. Causes and characteristics of break-down of hot rolling mills rolls. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2014, no. 3, pp. 14–17.
4. Teterin P.K. *Teoriya poperechnoi i vintovoi prokatki* [Theory of cross and screw rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1983, 270 p. (In Russ.).
5. Bystrov V.A., D'yakov P.K., Umanets A.G. Operating conditions and wear of hot metal mill rolls. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 5, pp. 24–29. (In Russ.).
6. Sinnave M. New grades of mill rollers and development of their production. *Stal'*. 2003, no. 7, pp. 48–52. (In Russ.).
7. Romantsev B.A., Aleshchenko A.S., Tsyutsyura V.Yu., Lube I.I. Features of wear of working rolls of TPA 159-426 piercing mill at rolling continuous cast billets of large diameter. *Proizvodstvo prokata*. 2016, no. 6, pp. 20–27. (In Russ.).
8. Romantsev B.A., Aleshchenko A.S., Tsyutsyura V.Yu., Tyshchuk I.N., Lube I.I. Features of piercing mill TPA 50-200 working roll wear during rolling continuously-cast and hot-rolled billets. *Metallurgist*. 2017, no. 9-10, pp. 1062–1069.
9. *Stan CKBMM 44 dlya prokatki sharov 40-80. Tekhnicheskii proekt* [TSKBMM 44 mill for rolling the balls 40-80. Technical project] Moscow: TsNIITMASH, 1955. (In Russ.).
10. Peretyat'ko V.N., Klimov A.S., Filippova M.V. Calibration of rolls of a ball-rolling mill. Part 1. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 4, pp. 27–30. (In Russ.).
11. Filippova M.V., Smetanin S.V., Peretyat'ko V.N. Computer modeling of rolling balls in screw gage. In: *Modelirovanie i naukoemkie informatsionnye tekhnologii v tekhnicheskikh i sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh. Trudy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Modeling and high-tech information technologies in technical and socio-economic systems. Proceedings of the 4th All-Russian Sci. and Pract. Conf. with Int. Participation]. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2016, pp. 290–294. (In Russ.).
12. Filippova M.V., Peretyat'ko V.N., Smetanin S.V. Stresses and strains during rolling of the ball. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, no. 8, pp. 587–588. (In Russ.).
13. Tselikov A.I., Barbarich M.V. *Spetsial'nye prokatnye stany* [Special rolling mills] Moscow: Metallurgiya, 1971, 336 p. (In Russ.).
14. Tselikov A.I. *Teoriya rascheta usilii v prokatnykh stanakh* [Theory of efforts calculation for rolling mills] Moscow: Metallurgiya, 1962, 496 p. (In Russ.).
15. Grudeev A.P. *Vneshnee trenie pri prokatke* [External friction during rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 228 p. (In Russ.).
16. Gulyaev Yu.G., Shifrin E.I., Lube I.I., Garmashev D.Yu., Nikolaenko Yu.N. Geometry of the deforming region in rotary-rolling mills. *Steel in Translation*. 2013, vol. 43, no. 11, pp. 758–761.
17. Krasnevskii S.M., Makushok E.M., Shchukin V.Ya. *Razrushenie metallov pri plasticheskoi deformatsii* [Metals fracture by plastic deformation] Minsk: Nauka i tekhnika, 1983, 173 p. (In Russ.).
18. Novik F.S., Arsov Ya.B. *Optimizatsiya protsessov tekhnologii metallov metodami planirovaniya eksperimentov* [Optimization of metals processing technology by methods of experiments design] Moscow: Mashinostroenie; Sofiya: Tekhnika, 1980, 304 p. (In Russ.).
19. Belov V.I., Razgulin I.A. Estimation of average values of degree and rate of deformation using Deform 3D software at hot rolling. *Modelirovanie i razvitie protsessov OMD*. 2014, no. 20, pp. 153–157. (In Russ.).
20. Peretyat'ko V.N., Klimov A.S., Filippova M.V., Fedorov A.A. Calibration of rolls of a ball-rolling mill. In: *Metallurgiya, tekhnologiya, upravlenie, innovatsii, kachestvo* [Metallurgy, technology, management, innovations, quality]. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2010, pp. 258–265. (In Russ.).
21. Pater Zbigniew. Analysis of helical rolling process of balls formed from a head of a scrapper rail. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2016, vol. 10, no. 30, pp. 110–114.
22. Pater Z., Tomczak J., Bartnicki J., Lovell M.R., Menezes P.L. Experimental and numerical analysis of helical-wedge rolling process for producing steel balls. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2013, vol. 67, pp. 1–7.
23. Chila P., Pater Z., Tomczak J., Chila P. Numerical analysis of rolling process for producing steel balls using helical rolls. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2016, vol. 61, no. 2, pp. 485–492.
24. Pater Z. FEM analysis of the multi-wedge helical rolling process for a workholding bolt. *MATEC Web of Conferences*. 2016, vol. 80, pp. 130, 131.

## Information about the authors:

**V.Yu. Rubtsov**, Postgraduate of the Chair of Metallurgical Technology (Uriylo@mail.ru)

**O.I. Shevchenko**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Metallurgical Technology (Shevchenko.0leg@mail.ru)

**M.V. Mironova**, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Department of Nizhny Tagil Technological Institute (branch) (blastpurnace@mail.ru)

Received May 22, 2018

УДК 669.187.25

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПРЯМОГО ЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛИ МАРГАНЦЕМ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Дмитриенко А.В., аспирант кафедры металлургии черных  
металлов (dmvliv@gmail.com)*

*Протопопов Е.В., д.т.н., профессор кафедры металлургии черных  
металлов (protopopov@sibsiu.ru)*

*Дмитриенко В.И., к.т.н., доцент кафедры металлургии черных  
металлов (dmvliv@gmail.com)*

*Якушевич Н.Ф., д.т.н., профессор кафедры металлургии цветных металлов  
и химической технологии (kafcmets@sibsiu.ru)*

*Горюшкин В.Ф., д.х.н., профессор кафедры естественнонаучных  
дисциплин (koax@sibsiu.ru)*

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

**Аннотация.** Одним из путей повышения эффективности производства в черной металлургии является снижение расхода дорогостоящих и дефицитных ферросплавов. Большие возможности в этом направлении содержатся в технологии прямого легирования стали оксидными материалами. В настоящей работе проведено термодинамическое исследование процесса прямого легирования стали марганцевыми оксидными материалами (марганцевой рудой) и промышленное опробование этой технологии. Рассмотрены два варианта технологии прямого легирования: в окислительных условиях при плавке стали в современной 100-т электросталеплавильной печи и в восстановительных условиях при обработке стали на агрегате ковш – печь (АКП). Термодинамическое моделирование окислительного варианта технологии с помощью программного комплекса «Астра» показало, что существует возможность повысить содержание марганца в металле при вводе марганцевой руды. Определяющим фактором в этом процессе является текущее содержание углерода в стали. Для средне- и высокоуглеродистых сталей содержание марганца может быть повышено до 0,6 % и более. Для низкоуглеродистых сталей количество остаточного марганца определяется содержанием углерода в конце продувки кислородом. Приведена графическая зависимость. В восстановительных условиях основной реакцией процесса прямого легирования является  $MnO + Si = Mn + SiO_2$ . Термодинамический анализ дает довольно приблизительные данные, поэтому был применен полуэмпирический анализ, основанный на полученном из опытных промышленных результатов соотношении количеств оксидов FeO и MnO, содержащихся в шлаке в конце обработки стали на АКП. Такой вариант оценки процесса представляется возможным, так как система металл – шлак при длительной обработке стали на АКП приближается к равновесию. Используя это соотношение, а также условия сохранения исходной основности шлака и поддержания содержания FeO в шлаке на уровне около 1 %, было составлено балансовое уравнение, описывающее процесс прямого легирования марганцевой рудой в ковше. Уравнение позволило выполнить расчет основных технологических параметров процесса прямого легирования марганцевой рудой применительно к условиям производства. Получена хорошая сходимости теоретических расчетов и практических данных.

**Ключевые слова:** термодинамический анализ, прямое легирование, оксид марганца, внепечная обработка, марганцевая руда, продувка кислородом, шлак.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-933-938

### ВВЕДЕНИЕ

Применение оксидных марганцевых материалов с целью прямого легирования стали вызывает большой интерес, поскольку позволяет получить значительный экономический эффект при сокращении расхода дорогостоящих марганцевых ферросплавов. При этом хорошо известно, что использование традиционных продуктов технологии производства марганцевых сплавов для раскисления и легирования стали обеспечивает сквозное извлечение марганца не более 50 % [1]. Особая привле-

кательность этого направления состоит в том, что для подобных технологий могут быть привлечены ресурсы небольших месторождений регионального значения.

Различные варианты технологии прямого легирования были опробованы в условиях производства стали в конверторах и электросталеплавильных печах. Выполнен большой объем исследований технологии прямого легирования. К наиболее известным работам по изучению использования оксидных материалов для легирования сталей массового назначения можно отнести работы [2 – 6].

В условиях дефицита ресурсов наиболее активно вопросами прямого легирования при выплавке сталей занимается Япония. В настоящее время в Японии около 50 % марганца вводят в сталь в виде марганцевой руды [7]. Большинство работ по использованию марганцевой руды ориентировано на выплавку стали в конверторах [8 – 13]. Значительный объем исследований по изучению процессов прямого легирования в условиях электросталеплавильного процесса выполнен и обобщен в работе [14].

Наиболее технологично и просто прямое легирование можно реализовать путем присадки агломерата или богатой марганцевой руды в печь или ковш, расплавления и обработки восстановителем. Таким образом, применять прямое легирование можно как в окислительных, так и в восстановительных условиях при внепечной обработке стали.

**ОЦЕНКА ПРЯМОГО ЛЕГИРОВАНИЯ  
В ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ**

Для оценки процесса прямого легирования стали марганцем проведено термодинамическое моделирование с использованием программного комплекса «Астра» [15] для условий введения в печь марганцевой руды Дурновского месторождения (Кемеровская область). Исходные данные для моделирования: металл до присадки марганцевой руды содержал до 0,8 % С, ~0,2 % Мn; содержание основных компонентов в руде Дурновского месторождения: 47 % МnO, 14 % FeO, 21 % SiO<sub>2</sub>, 2 % CaO, 2 % MgO, 4 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; количество металла в дуговой сталеплавильной (ДСП) печи 100 т; количество исходного шлага в печи 5 т; состав шлага в печи: 20 % FeO, 45 % CaO, 16 % SiO<sub>2</sub>, 8 % MgO, 3 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 8 % МnO; количество присаживаемой руды 400 – 1200 кг; температура процесса 1873 К.

Результаты моделирования процесса прямого легирования стали в окислительный период плавки при различном количестве присаживаемой марганцевой руды представлены на рис. 1.

Полученные данные показывают, что при выплавке стали в ДСП существует технологическая возможность повышения текущего содержания марганца в металле. Присадка руды в объемах, приведенных в расчетах, не вызывает технических затруднений и может быть легко осуществлена через свод печи. Однако для определения оптимального количества вводимой руды необходимо обязательно учитывать, при каком содержании углерода металл будет выпускаться из печи. При выплавке средне- и особенно высокоуглеродистых сталей содержание марганца в металле за счет прямого легирования может быть доведено практически до требований, предъявляемым к углеродистым и низколегированным немарганцовистым сталям (0,5 – 0,6 %).

Для низкоуглеродистых сталей присадки большого количества руды неэффективны, так как значительная

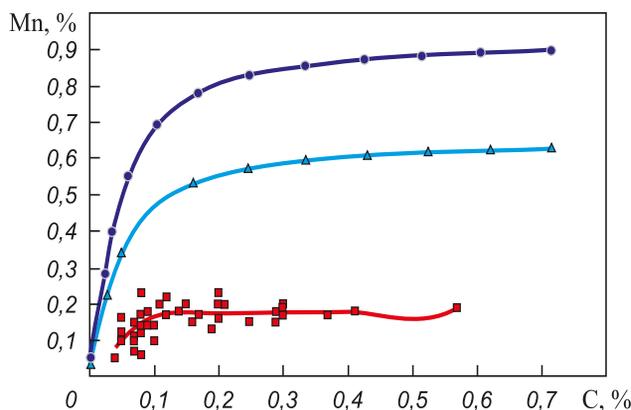


Рис. 1. Изменение содержания марганца в металле в ходе продувки при различном количестве присаживаемой марганцевой руды: ▲ – 400 кг; ● – 1200 кг; ■ – без присадок руды

Fig. 1. Changes in manganese content in metal during lancing with different amount of introduced manganese ore: ▲ – 400 kg; ● – 1200 kg; ■ – without ore additives

часть восстановленного марганца будет потеряна на заключительном этапе продувки металла кислородом. Как видно (рис. 1), для повышения содержания остаточного марганца примерно в два раза достаточно присаживать приблизительно 200 – 400 кг марганцевой руды.

Необходимо отметить, что при реализации продувки металла кислородом в ДСП, как правило, производится интенсивная подача порошкового углеродсодержащего материала на шлак, что, например, по данным работы [16] способствует снижению содержания МnO в шлаке.

Одним из важнейших показателей эффективности реализации процесса прямого легирования является извлечение марганца из оксидного материала. Показателем извлечения марганца может быть принят коэффициент извлечения, равный отношению количества марганца, усвоенного металлом, к количеству марганца, внесенного рудой. Теоретически этот коэффициент можно рассчитать с использованием данных равновесного распределения марганца между металлом и шлаком.

Наиболее совершенным методом оценки достижения равновесия в системе металл–шлак сталеплавильных систем может быть подход теории регулярных ионных растворов [17 – 19], хотя такой подход не дает достаточно точных данных [17]. При дальнейшем анализе для оценки пределов возможностей технологии прямого легирования использованы результаты проведенных промышленных опытных плавок.

Технология выплавки стали в ДСП имеет следующие особенности: металл расплавляется, проводится дефосфорация, обезуглероживание, нагрев до заданной температуры. При этом используются средства интенсификации плавки: фурмы-горелки и фурмы для дувания углеродсодержащего порошка для вспени-

вания шлака, после чего полупродукт выпускается в ковш и проводится внепечная обработка на АКП. При этом на выпуске производится отсечка шлака с помощью эркерного устройства печи. Для формирования активного ковшевого шлака на выпуске дополнительно присаживается шлакообразующая смесь на основе извести и плавикового шпата. Для предварительного раскисления металла параллельно присаживаются ферросплавы. После внепечной обработки на АКП металл разливают на МНЛЗ.

На опытных плавках марганцевую руду Дурновского месторождения присаживали в ковш совместно со шлакообразующей смесью в количестве 500 – 900 кг. При проведении опытных плавков углеродистых сталей выполняли предварительную сушку марганцевой руды. Обработаны результаты 50 проведенных опытных плавков без нарушения технологических инструкций: усредненный коэффициент извлечения марганца составил 0,98. Это является достаточно хорошим результатом и свидетельствует о стабильности процесса.

Сквозное усвоение кремния из кремнийсодержащих ферросплавов в проведенном исследовании составило 63 %. На плавках текущего производства без использования марганцевой руды этот показатель находится на уровне 67 %.

Прирост содержания фосфора за период внепечной обработки составил менее 0,002 %. Это значение на уровне или даже ниже показателя плавков текущего производства.

Необходимо отметить, что основной проблемой применения марганцевых руд и концентратов является довольно низкое (примерно до 40 %) содержание основного легирующего компонента (марганца) в пересчете на металлический марганец [20].

Таким образом, вместе с марганцем в металлургическую систему попадает большое количество оксидов, то есть шлакообразующих составляющих.

### ОЦЕНКА ПРЯМОГО ЛЕГИРОВАНИЯ В ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Для оценки технологических пределов использования марганцевых руд для прямого легирования необходимо обязательно учитывать сопутствующие химические соединения, содержащиеся в руде.

Исходные данные и допущения для проведения оценочных расчетов: содержание основных компонентов в марганцевой руде: 47 % MnO; 14 % FeO; 21 % SiO<sub>2</sub>; 2 % CaO; 2 % MgO; 4 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; количество металла 100 т; масса исходного шлака в ковше 2 т; содержание основных компонентов в исходном шлаке в ковше: 0,79 % MnO; 1,34 % FeO; 20,2 % SiO<sub>2</sub>; 51,5 % CaO; 8 % MgO; 5 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Восстановление марганца и оксида железа из шлака и руды происходит за счет присадки кремния. Важным моментом в расчетах является оценка содержания окси-

дов марганца в шлаке по окончании внепечной обработки стали. Для этого по данным промышленных плавков провели оценку соотношения количеств оксидов FeO и MnO в ковшевом шлаке.

Полученные результаты приведены на рис. 2.

Как и ожидалось, между содержаниями оксидов FeO и MnO в шлаке существует характерная зависимость, которая позволяет по содержанию одного оксида предсказать содержание второго. Для оценочных расчетов принято, что содержание оксида FeO в шлаке АКП составляет 1,34 % (усредненное значение по опытным плавкам), а равновесное содержание оксида MnO составляет 0,79 % (расчетная величина в соответствии с уравнением, представленным на рис. 2). Все поступившие оксиды FeO и MnO (выше 1,34 % FeO и 0,79 % MnO), попадающие в шлак с марганцевой рудой, будут восстановлены кремнием, специально присаживаемым для этой цели в расплав. Основность шлака должна остаться на исходном уровне, для чего в ковш необходимо присаживать соответствующее количество извести. Указанные особенности технологии следует учитывать. Это необходимо для проведения полноценной десульфурации металла.

С учетом всех вышеперечисленных условий составлено балансовое уравнение, по которому рассчитаны основные параметры процесса прямого легирования при различных значениях количества присаживаемой марганцевой руды. Расчетные данные представлены на рис. 3.

### Выводы

Процесс прямого легирования эффективен в широком диапазоне количества присаживаемой марганцевой руды, что позволяет легировать углеродистые и низколегированные стали с коэффициентом усвоения марганца не менее 0,97. Основным фактором, ограничивающим применение технологии прямого

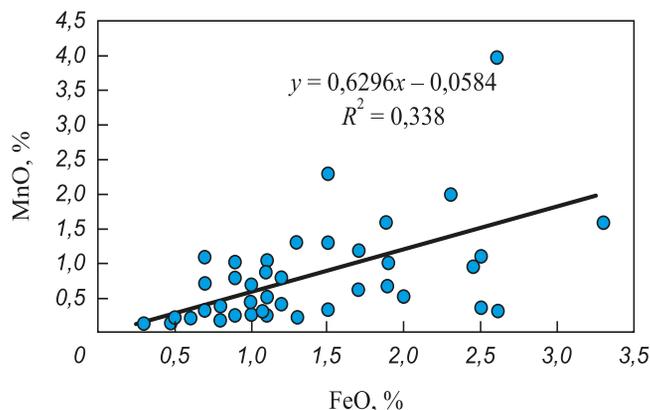


Рис. 2. Соотношение между содержаниями оксидов FeO и MnO в ковшевом шлаке при обработке на АКП

Fig. 2. Ratio between contents of FeO and MnO in ladle slag at LF processing

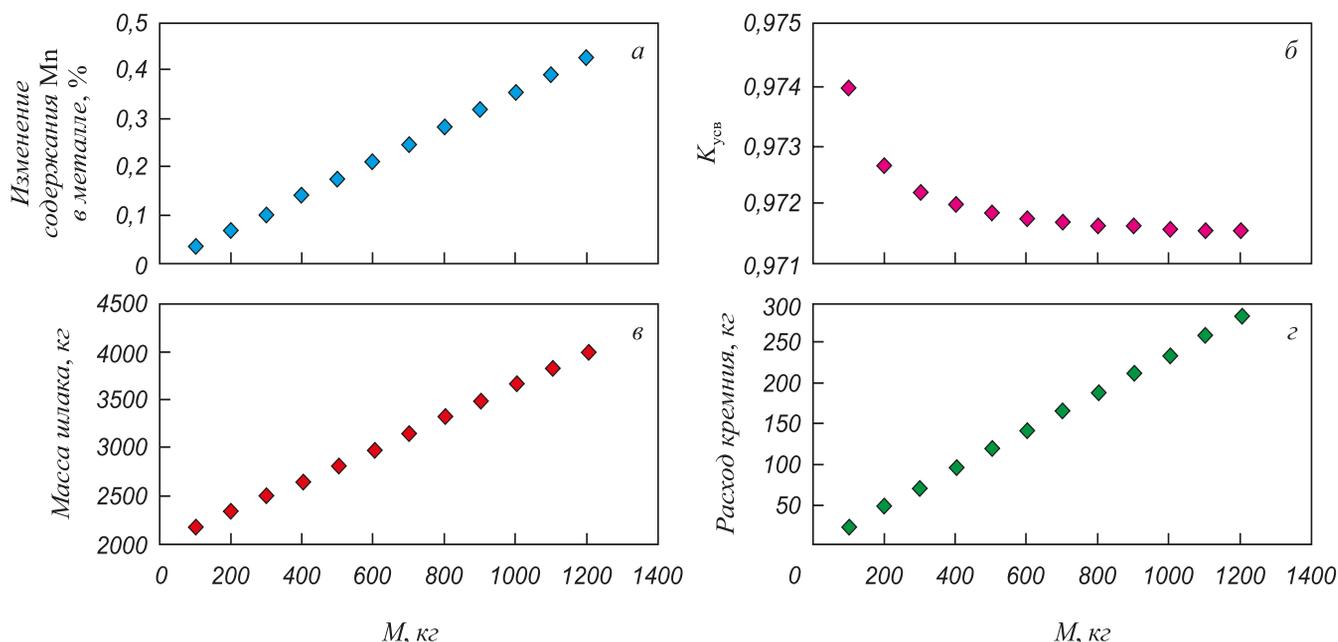


Рис. 3. Изменение содержания марганца в металле (а), изменение коэффициента усвоения ( $K_{уcв}$ ) марганца (б), изменение количества шлага в ковше (в) и расход кремния на восстановление компонентов марганцевой руды (з) в зависимости от количества (M) присаживаемой марганцевой руды

Fig. 3. Change in manganese content in metal (a), change in recovery rate ( $K_{уcв}$ ) of manganese (б), change in amount of slag in the ladle (в) and consumption of silicon for reduction of manganese ore components (з) depending on amount of introduced (M) manganese ore

легирования в условиях обработки стали на АКП, является увеличение количества шлага в ковше. В реальных условиях без дополнительных технологических мероприятий прямое легирование позволит увеличить содержание марганца в металле примерно на 0,3 %. Для достижения больших значений необходимо реализовать дополнительную операцию скачивания шлага из ковша, что осложнит реализацию технологии. Более высокие показатели эффективности можно обеспечить при применении прямого легирования в окислительных условиях с целью повышения содержания остаточного марганца в металле перед внепечной обработкой.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Булянда А.А., Наконечный А.Я., Мизин В.Г. Экономия марганца в конвертерном производстве стали // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1986. № 3. С. 12 – 13.
- Наконечный А.Я., Урцев В.Н., Афонин С.З., Синяков Р.В., Кудрин В.А., Хабибулин Д.М., Шмаков А.В. Преимущества использования безотходных и экологически рациональных технологий прямого легирования для комплексного решения проблемы ресурсосбережения и охраны окружающей среды. – В кн.: Труды одиннадцатого конгресса сталеплавателей. – М.: ОАО Черметинформация, 2011. С. 92 – 110.
- Бобкова О.С., Барсегян В.В. Перспективы развития технологий прямого легирования стали из оксидных расплавов // *Металлург*. 2006. № 9. С. 43 – 46.
- Толымбеков М.Ж., Такенов Т.Д., Ахметов А.Б. Прямое легирование стали марганцем. – Алматы: НИЦ «Гылым», 2003. – 304 с.
- Sacir Ali Fuat, Yaman Atilla Afes Tayfuu. Manganfalling aus schwefel sauer Losungen durch induzierte Oxidation // *Chem. Acta Turk*. 1982. Bd. 10. No. 1. P. 51 – 57.
- Черная металлургия зарубежных стран (обзор). Контракт № 062-3/36 от 23.05.96 г. – М.: АООТ «Черметинформация», 1996. – 74 с.
- Ubaruki T., Kanemoto M., Ogatoetal S. Development of smelting Reduction of Iron Ore-an Approach to Commercial Ironmaking // *Iron and Steelmaking*. 1990. No. 12. P. 30 – 37.
- Fruehan R.J. Condition and prospects of converter production development // *Process 6th International Iron and Steel Congress*, Nagoya, Oct. 21 – 26. 1990. No. 3. P. 73 – 85.
- Chappellen Ph. Application of manganese ore in steelmaking shop of plant Solla c Florange // *Revue de Métallurgie (France)*. 1989. Vol. 86. No. 12. P. 999 – 1001.
- Ibaraki Tetsuhari. Metallurgical effect of combined converter process with variable intensity of scavenging // *Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1984. Vol. 70. No. 12. P. 897.
- Kaneko Tonhiyuki. Lowslag process converter melting. Disoxidation of manganese ore during lowslag process // *Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1987. Vol. 73. No. 12. P. 275.
- Vargas-Ramirez M., Romero-Serrano A., Chavez-Alcala F. Reduction of MnO from molten slags with liquid steel of high carbon content // *Steel Research*. 2002. Vol. 73. No. 9. P. 75 – 80.
- Toshiyukk Kaneko. Definition of optimal composition of manganese agglomerate, which provide high speed of manganese disoxidation // *Current advances of materials and processes*. 1991. Vol. 4. No. 4. P. 1831 – 1838.
- Нохрина О.И. Развитие теории и разработка ресурсосберегающей технологии раскисления и легирования стали оксидными марганецсодержащими материалами: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Новокузнецк, 2005. – 43 с.
- Климов В.Ю., Рыбенко И.А., Мочалов С.П. Разработка и применение компьютерной инструментальной системы для термодинамических расчетов на базе программного комплекса «Астра» // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2005. № 4. С. 54 – 60.
- Suk Min-Oh, Sung-Koo, Seo Chang-Woo, Kim Seon-Hyo, Kim Jeon-Sik, Shim Sang-Chut, Kim Jcong-Tae. The effect of carbon in

- slag on steel reoxidation by CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-MnO-FeO slags // *Steel Res. Int.* 2005. Vol. 76. No. 4. P. 287–295.
17. Григорян В.А., Беляничков Л.Н., Стомахин Ф.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. – М.: Metallurgia, 1987. – 271 с.
  18. Meraikib Mohammed. Effect of BaO, basicity and temperature on manganese distribution between slag and hot metal in blast furnace // *Steel Res. Int.* 2009. Vol. 80. No. 2. P. 99–106.
  19. Банья С., Донг-Шим. Применение модели регулярных растворов к сталеплавильным шлакам. – В кн.: IX Советско-японский симпозиум по физико-химическим основам металлургических процессов. – М.: ИМЕТ АН СССР, 1983. С. 21–41.
  20. Яковлев П.Д. Промышленные типы рудных месторождений: Учебное пособие для вузов. – М.: Недра, 1986. – 358 с.

Поступила 12 октября 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 12, pp. 933–938.

## DIRECT STEEL ALLOYING BY MANGANESE UNDER RECENT CONDITIONS OF ELECTRIC STEEL-MAKING

*A.V. Dmitrienko, E.V. Protopopov, V.I. Dmitrienko, N.F. Yakushevich, V.F. Goryushkin*

**Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia**

**Abstract.** One of the directions of increasing production efficiency in ferrous metallurgy is reduction of expensive and scarce ferroalloy consumption. Great opportunities in that direction are provided by technology of direct steel alloying by oxide materials. Thermodynamic study of the process of direct steel alloying by manganese oxide materials (manganese ore) and industrial testing of that technology has been done in that work. Two options of direct alloying technology have been considered: during steel melting in modern 100-ton EAF in oxidative conditions and during processing of steel on ladle furnace (LF) in reductive conditions. Thermodynamic modeling of oxidative technology option by TERRA software package has shown that there is opportunity to increase content of manganese in metal by manganese ore injection. Key factor in that process is current carbon content in steel. Content of manganese can be raised up to 0.6 % and more in medium- and high-carbon steel. Residual manganese in low-carbon steel is defined by value of carbon content in the end of oxygen lancing. Graphic dependence is provided.  $MnO + Si = Mn + SiO_2$  is main reaction of the process of direct alloying under reductive conditions. Thermodynamic analysis gives very rough data. That is why semi-empirical analysis was performed, which was based on received industrial results of FeO and MnO proportion contained in slag in the end of steel processing at LF. That way of process estimation is considered reasonable, because of approximation to balance of metal-slag system during long processing of steel at LF. Using this proportion, and conditions of slag initial basicity retaining and maintaining of FeO content in slag at level around 1 %, balance equation describing process of direct steel alloying by manganese ore at ladle was derived. This equation helps to calculate basic technological parameters of the process of direct alloying by manganese ore as applied to specific conditions of production. Good convergence of theoretical calculation and practical data has been received.

**Keywords:** thermodynamic analysis, direct alloying, manganese oxide, ladle furnace, out-of-furnace processing, manganese ore, oxygen lancing, slag.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-12-933-938

### REFERENCES

1. Bulyanda A.A., Nakonechnyi A.Ya., Mizin V.G. Manganese saving in converter steel production. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 1986, no. 3, pp. 12–13. (In Russ.).
2. Nakonechnyi A.Ya., Urteev V.N., Afonin S.Z., Sinyakov R.V., Kudrin V.A., Khabibulin D.M., Shmakov A.V. The advantages of using waste-free and environmentally rational direct alloying technologies for a complex solution to the problem of resource saving and environment protection. In: *Trudy odinnadsatogo kongressa staleplavil'shchikov* [Proc. of the 11th Congress of Steelmakers]. Moscow: Chernetinformatsiya, 2011, pp. 92–110. (In Russ.).
3. Bobkova O.S., Barsegyan V.V. Prospects of technologies for the direct alloying of steel from oxide melts. *Metallurgist*. 2006, vol. 50, no. 9-10, pp. 463–468.
4. Tolymbekov M.Zh., Takenov T.D., Akhmetov A.B. *Pryamoe legirovanie stali margantsem* [Direct alloying of steel with manganese]. Almaty: NITs "Fylym", 2003, 304 p. (In Russ.).
5. Cacir Ali Fuat, Yaman Atila Afes Tayfuu. Manganfalling aus schwefel sauer Losungen durch induzierte Oxidation. *Chem. Acta Turk*. 1982, Bd. 10, no. 1, pp. 51–57.
6. *Chernaya metallurgiya zarubezhnykh stran (obzor). Kontrakt № 062-3/36 ot 23.05.96 g.* [Ferrous metallurgy of foreign countries (review). Contract no. 062-3/36, May 23, 1996]. Moscow: Chernetinformatsiya, 1996, 74 c. (In Russ.).
7. Ubaruki T., Kanemoto M., Ogatoetal S. Development of smelting Reduction of Iron Ore-an Approach to Commercial Ironmaking. *Iron and Steelmaking*. 1990, no. 12, pp. 30–37.
8. Fruehan R.J. Condition and prospects of converter production development. *Process 6th International Iron and Steel Congress, Nagoya, Oct. 21–26. 1990*, no. 3, pp. 73–85.
9. Chappellen Ph. Application of manganese ore in steelmaking shop of plant Solla c Florange. *Revue de Métallurgie (France)*. 1989, vol. 86, no. 12, pp. 999–1001.
10. Ibaraki Tetsuhari. Metallurgical effect of combined converter process with variable intensity of scavenging. *Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1984, vol. 70. no. 12, pp. 897.
11. Kaneko Tonhiyuki. Lowslag process converter melting. Disoxidation of manganese ore during lowslag process. *Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1987, vol. 73, no. 12, pp. 275.
12. Vargas-Ramirez M., Romero-Serrano A., Chavez-Alcala F. Reduction of MnO from molten slags with liquid steel of high carbon content. *Steel Research*. 2002, vol. 73, no. 9, pp. 75–80.
13. Toshiyukk Kaneko. Definition of optimal composition of manganese agglomerate, which provide high speed of manganese disoxidation. *Current advances of materials and processes*. 1991, vol. 4, no. 4, pp. 1831–1838.
14. Nokhrina O.I. *Razvitie teorii i razrabotka resursosberegayushchei tekhnologii raskisleniya i legirovaniya stali oksidnymi marganetsosoderzhashchimi materialami: Avtoref. diss. d-ra tekhn. nauk* [Development of theory and resource-saving technology of deoxidation and alloying of steel with manganese oxide materials: Extended Abstract of Dr. Sci. Diss.]. Novokuznetsk, 2005, 43 p. (In Russ.).
15. Klimov V.Yu., Rybenko I.A., Mochalov S.P. Development and application of computer tool system for thermodynamic calculations based on Astra software package. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2005, no. 4, pp. 54–60. (In Russ.).

16. Suk Min-Oh, Sung-Koo, Seo Chang-Woo, Kim Seon-Hyo, Kim Jeon-Sik, Shim Sang-Chut, Kim Jcong-Tae. The effect of carbon in slag on steel reoxidation be CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO-MnO-FeO slags. *Steel Res. Int.* 2005, vol. 76, no. 4, pp. 287–295.
17. Grigoryan V.A., Belyanchikov L.N., Stomakhin F.Ya. *Teoreticheskie osnovy elektrostaleplavil'nykh protsessov* [Theoretical foundations of electric melting processes]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 271 p. (In Russ.).
18. Meraikib Mohammed. Effect of BaO, basicity and temperature on manganese distribution between slag and hot metal in blast furnace. *Steel Res. Int.* 2009, vol. 80, no. 2, pp. 99–106.
19. Ban'ya S., Dong-Shim. Application of the model of regular solutions to steel slags. In: *LX Sovetsko-yaponskii simpozium po fiziko-khimicheskim osnovam metallurgicheskikh protsessov* [9th Soviet-Japanese Symposium on the Physico-Chemical Fundamentals of Metallurgical Processes]. Moscow: IMET AN SSSR, 1983, pp. 21–41. (In Russ.).
20. Yakovlev P.D. *Promyshlennye tipy rudnykh mestorozhdenii: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Industrial types of ore deposits: Manual for Universities]. Moscow: Nedra, 1886, 358 p. (In Russ.).

**Information about the authors:**

**A.V. Dmitrienko**, Postgraduate of the Chair of Ferrous Metallurgy (dmvliv@gmail.com)

**E.V. Protopopov**, Dr Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy (protopopov@sibsiu.ru)

**V.I. Dmitrienko**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Ferrous Metallurgy (dmvliv@gmail.com)

**N.F. Yakushevich**, Dr Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Non-Ferrous Metallurgy and Chemical Engineering" (kafcmet@sibsiu.ru)

**V.F. Goryushkin**, Dr. Sci. (Chem.), Professor of the Chair of Science named after V.M. Finkel (koax@sibsiu.ru)

Received October 12, 2018

УДК 669-5:621.771:669.018.25

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРОЧНЕНИЯ ТВЕРДЫМ СПЛАВОМ СМЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ

*Быстров В.А., д.т.н., доцент, профессор кафедры менеджмента  
и отраслевой экономики (bistrov39@yandex.ru)*

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

**Аннотация.** Для упрочнения быстроизнашивающихся деталей, работающих при высокотемпературных видах износа, широко применяются композиционные материалы (КМ) на основе тугоплавких твердых сплавов, в качестве которых используются карбиды переходных металлов IV – VI групп А, определяющие физику высокотемпературного износа. Для этих целей используется спеченный твердый сплав типа ТН 20 на основе (Ti, Mo)C–Ni–Mo, имеющий кольцевую структуру, предотвращающую образование сложнолегированных структур на границе раздела твердая частица–матрица. Благодаря минимальной растворимости спеченного твердого сплава типа ТН 20 в сплаве-связке на поверхности раздела твердая частица–матрица практически не выделяются сложнолегированные структурные фазы, вызывающие охрупчивание и рост остаточных термических напряжений и деформаций, что приводит к повышению износостойкости и росту срока службы упрочненных деталей. С целью повышения эффективности работы металлургических агрегатов за счет упрочнения сменных деталей композиционным материалом на основе спеченного твердого сплава типа ТН 20 с использованием электрошлаковой наплавки (ЭШН) разработана комплексная программа управления эффективностью упрочнения деталей. В процессе управления наплавкой твердым сплавом особое внимание уделено жаропрочности и высокотемпературной износостойкости КМ, которые определяются комплексом свойств твердых частиц. Следовательно, сохранение высоких механических, теплофизических и энергетических характеристик карбидов и снижение растворимости твердых частиц в матрице КМ при наплавке является первоочередной задачей повышения эффективности в процессе упрочнения сменных деталей. Комплексная программа управления процессом ЭШН КМ основана на управляющих воздействиях, направленных на предотвращение образования сложнолегированных структур на поверхности раздела твердая частица–матрица; снижение термических напряжений и деформаций (приводящих к образованию трещин и выкрашиванию твердых частиц при абразивном износе); повышение высокотемпературной износостойкости. Применение разработанных систем управляющих воздействий на процесс упрочнения быстроизнашивающихся деталей металлургического оборудования позволило значительно увеличить срок службы сменных деталей и повысить производительность металлургических агрегатов, что обеспечило получение определенного экономического эффекта.

**Ключевые слова:** спеченный твердый сплав, граница раздела твердая частица–матрица, растворимость твердых частиц, релаксация напряжений.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-939-947

### ВВЕДЕНИЕ

Эффективность работы основных металлургических агрегатов зависит от долговечности и износостойкости быстроизнашивающихся деталей и узлов, определяющих срок службы оборудования и себестоимость продукции. Металлургические агрегаты работают при повышенных температурах. Многие детали, соприкасаясь с раскаленным материалом, испытывают высокотемпературный абразивный износ, следовательно, работоспособность быстроизнашивающихся сменных деталей металлургических агрегатов определяется их способностью сопротивляться воздействию высокотемпературного абразивного износа [1].

### ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для предотвращения высокотемпературного износа сменные детали металлургических агрегатов необходимо упрочнять композиционными материалами (КМ) на основе жаропрочных карбидных частиц, например ре-

литом ( $WC + W_2C$ ). Однако релит интенсивно растворяется в сплаве-связке на основе железа, что побудило исследователей искать новые безвольфрамовые КМ. Поэтому совершенствование процесса упрочнения деталей металлургического оборудования новыми КМ на основе спеченных твердых сплавов типа ТН 20 (мониторинг) является весьма актуальной задачей [2 – 4].

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выбор карбидов осуществляли на основе анализа их свойств, во-первых – их предельной растворимостью в расплавах; во-вторых – их механическими, теплофизическими и энергетическими характеристиками при воздействии высоких температур; в-третьих – разупрочнением карбидов металлов при повышенных температурах. Анализ механических, теплофизических и энергетических характеристик карбидов (табл. 1), нашедших широкое применение в области упрочнения [3, 5 – 7], показал, что оптимальным сочетанием свойств в убывающей степени обладают карбиды TiC,

**Механические, теплофизические свойства и энергия разрушения карбидов переходных металлов IV – VI групп А**

*Table 1. Mechanical, thermophysical properties and fracture energy of carbides of transition metals of IV – VI groups A*

Химическое соединение	Температура плавления, К	Плотность, мг/м <sup>3</sup>	Теплота плавления, кДж/моль	Предельная энергия разрушения		Микротвердость, ГПа	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности, МПа, при		
				$A_{пр} \cdot 10^{11}$ , Дж/м <sup>3</sup>	в % к Fe <sub>3</sub> C			сжатию	изгибе	растяжении
Fe <sub>3</sub> C	1923	7,69	80,40	1313	100	8,00	217	280	225	260
TiC	<b>3530</b>	<b>4,93</b>	<b>177,96</b>	<b>2470</b>	<b>188</b>	<b>32,0</b>	<b>460</b>	<b>1380</b>	<b>280 – 870</b>	<b>560 – 1050</b>
VC	2920	5,77	135,25	<b>2372</b>	<b>180</b>	29,4	430	620	340	800
NbC	<b>3886</b>	7,83	146,55	<b>2655</b>	<b>202</b>	24,0	345	<b>2423</b>	540	<b>670</b>
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	2168	6,68	134,00	1275	97	22,0	380	1048	270	240
Mo <sub>2</sub> C	2795	9,18	<b>171,70</b>	2125	162	18,6	544	640	360	560
WC	3058	15,70	<b>224,00</b>	1720	131	21,0	<b>710</b>	<b>2920</b>	<b>30 – 560</b>	350

Примечание. Жирным шрифтом выделены наивысшие свойства карбидов TiC, NbC и WC.

NbC и WC. Они имеют высокую предельную энергию разрушения (2470, 2655 и 1720 Дж/м<sup>3</sup> соответственно), высокую температуру плавления (3530, 3886 и 3058 К соответственно) при достаточно высоких механических свойствах.

Таким образом, сопоставляя весь комплекс свойств высших карбидов, приведенный как отечественными [1 – 4], так и зарубежными авторами [5 – 7], установлено, что наилучшими свойствами для КМ обладает карбид титана, составляющий основу сплава ТН 20. Исследования зарубежных авторов [8 – 10] и наши разработки [3, 4] позволили спрогнозировать эффективность применения композиционных материалов. Спеченные твердые сплавы обладают рядом весьма ценных свойств: высокой твердостью 86 – 92 HRA; высокой микротвердостью  $H_{\mu} = 19,5 – 22,0$  ГПа;  $E = 445$  ГПа; высоким пределом прочности при сжатии – до  $\sigma_{сж} = 6,0$  ГПа, достаточной прочностью на изгиб –  $\sigma_{изг} = 1,2 – 2,5$  ГПа и на растяжение  $\sigma_{в} = 0,5\sigma_{изг}$ . И самое благоприятное свойство среди известных карбидов – это высокая ударная вязкость 0,8 – 1,2 МДж/м<sup>2</sup>. Способность спеченных твердых сплавов ТН 20 сохранять указанные свойства при повышенных температурах является чрезвычайно важной характеристикой при высокотемпературном абразивном износе металлургического оборудования.

Сплав ТН 20 после спекания приобретает «кольцевую структуру» (рис. 1): ядро – TiC, средняя зона – твердый раствор (Ti, Mo)C с небольшим количеством никеля, внешняя оболочка – никель-молибденовый твердый раствор [3, 4]. Такая структура, благодаря внешней никелевой оболочке, снизила реакционную способность этого сплава, улучшила смачиваемость металлами группы железа, повысила термостойкость и жаропрочность КМ.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Исследования показали, что наиболее перспективным оказался электрошлаковый способ упрочнения сменных деталей разработанным КМ, поскольку позволяет управлять процессом наплавки за счет введения твердых частиц в зону более низких температур, причем дозированными порциями, которые вызывают ускорение кристаллизации расплава [1, 11]. Для управления эффективностью электрошлаковой наплавкой композиционным материалом (ЭШН КМ) сменных деталей, что соответствует поставленной цели упрочнения быстроизнашивающихся деталей путем повышения износостойкости и жаропрочности наплавленного КМ, необходимо решить ряд задач.

Во-первых, особую трудность при формировании рациональных программ управления процессом ЭШН КМ вызывает отсутствие не только стандартных программ управления для различных ситуаций, но и сама

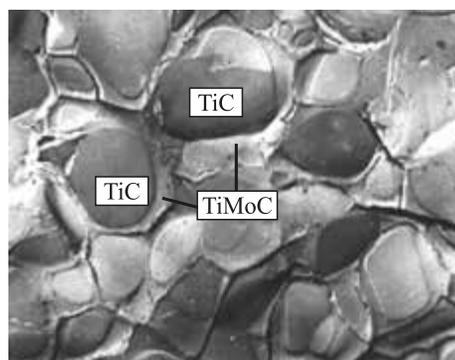


Рис. 1. Кольцевая структура спеченного твердого сплава ТН 20,  $\times 15\ 200$

Fig. 1. Ring structure of baked hard alloy TN 20,  $\times 15\ 200$

технология упрочнения постоянно видоизменяется. Во-вторых, отсутствуют достоверные сведения о растворимости твердых частиц в сплаве-связке, определяющие жаропрочность и износостойкость КМ. В-третьих, недостаточно изучена на основе дислокационного и энергетического анализов морфология образования поверхности раздела сплав ТН 20 – матрица. С этой целью разработана комплексная программа управления эффективностью упрочнения деталей на основе информации, полученных авторами в своих исследованиях, с одновременным совершенствованием способа ЭШН [12 – 15].

При формировании рациональных программ управления ЭШН КМ для  $l$ -й наплавки в число определяющих признаков класса  $K_{i,l}$  ситуаций входят векторы: начального состояния детали – объекта наплавки  $X_{o,l}$ ; ограничений по условиям эксплуатации и по различным требованиям к свойствам наплавленного слоя и границы взаимодействия твердых частиц с расплавом сплава-связки (поверхности раздела твердая частица – матрица), зона термического влияния (ЗТВ) детали  $O_l$ ; заданий со стороны заказчика  $Z_l$  на характеристики наплавки (качество, стоимость, производительность, технологичность, наличие оборудования); прогнозируемого изменения во времени внешних воздействий  $W_l^n(t)$  (рис. 2) [13].

Иногда в качестве заданий (кроме основных) могут выступать материал наплавленного слоя  $Z_{6l}$ ; свойства наплавленного слоя  $Z_{7l}$ ; свойства результатов взаимодействия твердых частиц с матрицей КМ  $Z_{8l}$ , или сплавления наплавленного слоя с основным металлом наплавляемой детали  $Z_{9l}$ , а в качестве ограничений по управлению – ограничения по способу наплавки  $U_{o2l}$ ; схеме наплавки  $U_{o3l}$ ; материалу электродов (наплавочный материал)  $U_{o4l}$ ; роду источника питания электрошлакового процесса (тока наплавки)  $U_{o5l}$ ; полярности тока  $U_{o6l}$ . Однако чаще всего задания  $Z_{6l} - Z_{8l}$  и ограничение по управлению  $U_{o2l} - U_{o7l}$  заказчиком не оговариваются и устанавливаются самой системой управления процессом ЭШН получения КМ. В число определяющих признаков группы решений  $\Gamma_{jil}$  входят: класс ситуаций  $K_{il}$ ; заданные значения выходных величин объекта в конце наплавки  $Y_{kl}^*$ ; заданные значения выходных величин объекта перед началом наплавки  $Y_{8ol}$ ; начальные значения управлений  $U_{ol}$ ; интегральные значения управлений  $U_l^n$ ; искомые программы управлений  $U_l(t_i)$ ; ограничения на область решений (например, растворимость спеченных твердых частиц в матрице КМ)  $O_l(t_{ji}^o)$ .

По результатам проверки соответствия ожидаемых значений вектора выходной величины объекта  $\bar{Y}_{kl}$  его заданным значениям  $Y_{kl}^*$  в блоке 9 принимаются решения об изменении управлений и группы решений  $\Gamma_{jil}$ . При необходимости управление и  $\Gamma_{jil}$  корректируются в цикле до близкого совпадения  $\bar{Y}_{kl} \approx Y_{kl}^*$ . Если наплавка предполагается на ранее созданной установке, то способ наплавки  $U_{o2l}$ , схема наплавки  $U_{o3l}$ , материал электро-

дов  $U_{o4l}$ , род тока  $U_{o5l}$ , полярность тока  $U_{o6l}$  и источник питания  $U_{o7l}$ , как правило, заранее известны. Это существенно ограничивает область решений, внося большую определенность в признаки группы решений  $\Gamma_{jil}$ . Поскольку выбор материала наплавленного слоя  $U_{o1l}$  одновременно зависит и от многих прочих управлений в системе, влияющих на траекторию изменения температуры каждой точки наплавленного слоя ЗТВ во времени, то требуемые свойства  $Y_{k1l}^*$ ,  $Y_{k2l}^*$ ,  $Y_{k3l}^*$ , близкие к соответствующим значениям заданий, можно получить лишь при условии определения всех прочих управлений.

Предварительное назначение материала наплавленного слоя  $U_{o1l}$  в функции  $Y_{o1l}^*$ , который в свою очередь является функцией  $Y_{k1l}^* - Y_{k3l}^*$ , зависит от того, какими свойствами обладает тот или иной материал и какие они претерпевают изменения в ходе наплавки.

Следовательно, если выбор КМ одновременно зависит от многих прочих управлений в системе, влияющих на зону сплавления твердая частица – матрица, определяющую износостойкость КМ, то его можно получить при условии определения всех прочих управлений. Решение этой задачи осуществляется так: 1) на основе теории кинетической совместимости твердых частиц подбирают [16, 17] нейтральный состав сплава-связки с минимальной растворимостью сплава ТН 20 в матрице; 2) наносится барьерное покрытие путем борирования твердых частиц [18, 19]; 3) исследуется возможность нанесения карбида молибдена  $Mo_2C$  в качестве защитного покрытия на твердые частицы.

На поверхности твердых частиц сплава ТН 20 в случае превышения предела растворимости бора в титане появляется фаза TiB с образованием новой межфазной границы, представляющей собой карбоборид титана. На рис. 3 приведена микроструктура композиционного материала ТН 20 + колмоной (сплав-связка колмоной содержит 3,2 % В). Интенсивность роста количества боридов на границе раздела определяется скоростью диффузии бора в его решетке, что снижает растворимость сплава ТН 20 и образование сложнелегированных структур на поверхности раздела сплава ТН 20 – матрица.

Условия разупрочнения и предельная растворимость сплава ТН 20 в матрице приведены в работах [3, 4, 19], где дается следующее определение: «Поверхность раздела представляет собой область с существенно измененным химическим составом, в которой осуществляется связь между составляющими композиционной структуры и обеспечивается передача нагрузки между ними».

Образование и протяженность поверхности раздела зависят от массы подаваемых частиц и времени пребывания твердых частиц в расплаве матрицы. Объемная доля твердых частиц в КМ должна быть не менее 42 – 44 % с целью предотвращения растворения TiC в матрице. Дополнительно проведенные исследования показали (табл. 2), что разработанные КМ имеют объемную долю твердых частиц в матрице выше кри-

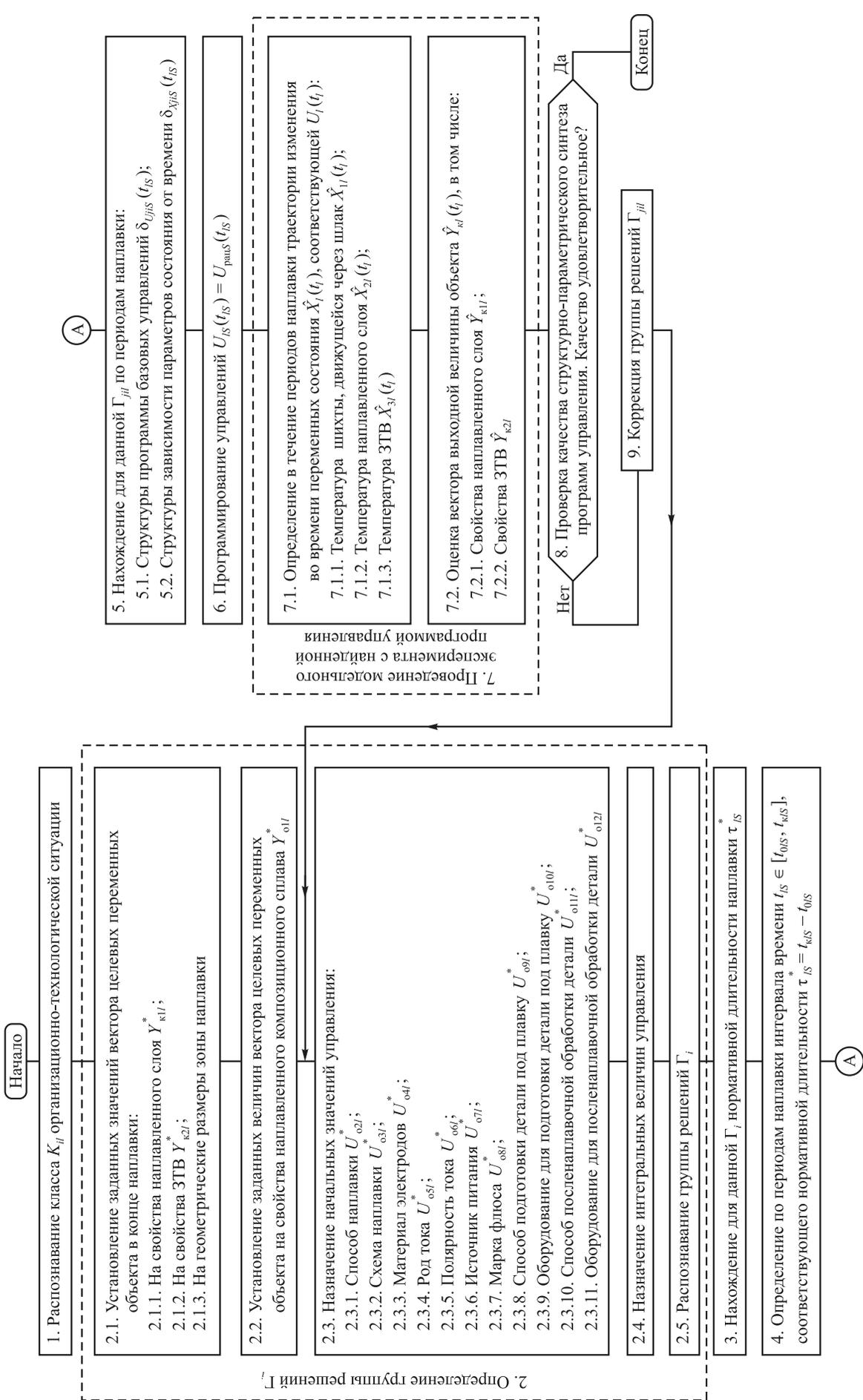


Рис. 2. Схема синтеза рациональных программ управления наплавкой ЭШН КМ

Fig. 2. Diagram of control programs synthesis for CM ESW

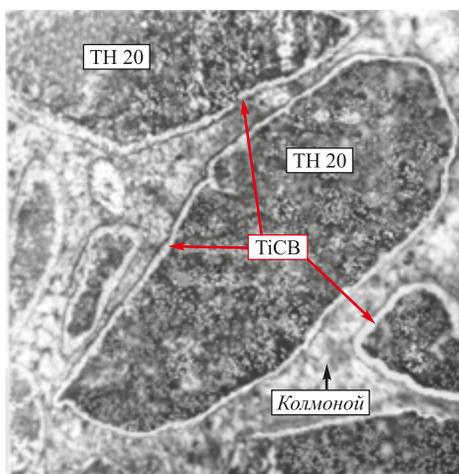


Рис. 3. Микроструктура КМ с осажженным бором на поверхности сплава сплава ТН 20, ×120

Fig. 3. Microstructure of CM with settled down boron at TN 20 surface, ×120

тических значений (54 – 57 %), что свело до минимума образование сложнлегированных структур, выделение новых фаз на поверхности раздела и снизило термические напряжения на этом участке [1, 3, 4].

Повышение объемной доли твердых частиц в матрице способствовало росту высокотемпературной прочности КМ (табл. 3) за счет снятия внутренних напряжений и выделения в матрице упрочняющих дисперсных фаз на поверхности раздела из пересыщенного твердо-

го раствора при кристаллизации КМ. Это, безусловно, сказалось на повышении износостойкости при высокотемпературном абразивном износе (рис. 4).

Кроме того, с повышением объемной доли твердых частиц в матрице КМ проявился «теневой эффект», описанный в работах [1, 11] и наблюдаемый при испытаниях на высокотемпературный абразивный износ. Отмечено, что наиболее устойчивой сопротивляемостью изнашиванию при повышении температуры обладает сплав КМ ТН 20 + колмоной. С повышением температуры испытания от 200 до 600 °С износ этого сплава увеличился всего на 25 %.

Конечной стадией управления эффективностью упрочнения сменных деталей металлургического оборудования является регулирование энергоемкости ЕКМ, которая определяется суммарной величиной энергии, поглощаемой КМ при взаимодействии с абразивными частицами в процессе изнашивания:

$$E_{\text{КМ}} = E_{\text{в}} + E_{\text{тр}} + E_{\text{рк}} + E_{\text{пл}} + E_{\text{мп}} + E_{\text{вн}}; \quad (1)$$

здесь  $E_{\text{в}}$  – энергия вдавливания, характеризуемая микротвердостью твердых частиц и абразива;  $E_{\text{тр}}$  – энергия зарождения и развития трещины, характеризуемая свойством матрицы;  $E_{\text{рк}}$  – энергия разрушения карбидов;  $E_{\text{пл}}$  – энергия плотности дислокаций, оцениваемая свойствами поверхности раздела;  $E_{\text{мп}}$  – энергия мартенситных превращений на поверхности раздела;  $E_{\text{вн}}$  – остаточные внутренние напряжения в переходной зоне.

Т а б л и ц а 2

Результаты стереологического анализа КМ на основе сплава ТН 20

Table 2. Results of stereological analysis of CM based on TN 20

Сплав-связка	Метод получения твердых частиц ТН 20	Стереометрические параметры исследуемых КМ				
		Исходная фракция, мм	$\bar{L}_k$ , мкм	$\bar{T}_k$ , мкм	$\bar{V}_k$ , %	$\bar{S}_k$ , мм <sup>-1</sup>
Колмоной 55X16H75C3P3	Дробленые	1,5 ÷ 3,0	2184	1872	53,8	0,5
	Сферические	0,4 ÷ 0,8	614	377	57,7	3,4
	С покрытием	0,8 ÷ 1,2	967	897	53,4	0,98

П р и м е ч а н и е.  $\bar{L}_k$  – средний линейный размер твердых частиц;  $\bar{T}_k$  – среднее линейное расстояние между карбидами;  $\bar{V}_k$  – средняя объемная доля карбидов в КМ;  $\bar{S}_k$  – удельная поверхность границ карбидов в матрице.

Т а б л и ц а 3

Высокотемпературная прочность материалов КМ на растяжение

Table 3. High temperature strength of CM materials on stretching

Компоненты композиционного материала	Предел прочности, МПа, при температурах испытания, °С									
	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
ПГ-СРЗ (сплав-связка)	338	345	360	404	420	376	320	276	212	201
ТН 20 (твердый сплав)	476	512	543	578	606	572	505	409	355	317
КМ – ТН 20 + ПГ-СРЗ	375	383	418	459	482	472	414	356	309	254

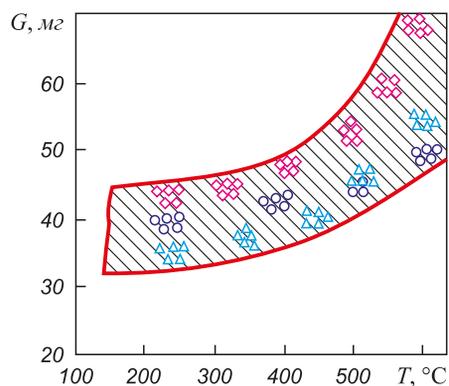


Рис. 4. Влияние температуры на износ КМ (ТН 20 + колмоной):

○ – фракция 0,6 ÷ 0,8 мм; ◇ – фракция 1 ÷ 1,2 мм;  
 △ – фракция 1,6 ÷ 1,8 мм

Fig. 4. Effect of temperature on CM wear (TN 20 + colmony):

○ – fraction 0.6 ÷ 0.8 mm; ◇ – fraction 1 ÷ 1.2 mm;  
 △ – fraction 1.6 ÷ 1.8 mm

Энергия вдавливания  $E_v$  определяется микротвердостью материала и абразива:

$$E_v = 2\pi H_v \Delta h^2 r, \quad (2)$$

где  $H_v$  – микротвердость твердых частиц, ГПа;  $\Delta h$  – глубина вдавливания абразива в металл, мм;  $r$  – радиус абразивной частицы, мм.

Решая уравнение (2) относительно КМ, получаем отрицательную величину  $\Delta h$ , это свидетельствует о том, что царапая и резая твердых частиц абразивом не происходит. Однако абразивный износ у некоторых КМ существует и иногда довольно значительный. Следовательно, определенные процессы превалируют по отношению к микротвердости, например, продукты взаимодействия твердых частиц с матрицей, образующиеся на границе раздела фаз. Решая уравнение относительно матрицы, получаем  $\Delta h = (0,85 - 2,4) \cdot 10^{-5}$  за один цикл, что свидетельствует о возможности образования резания [4 – 6]. Например, для била звездочки роторной дробилки агломерата, наплавленной КМ с микротвердостью твердых частиц  $H_\mu = 22,8$  ГПа и микротвердостью матрицы  $H_\mu = 6,8$  ГПа, вращающейся с угловой скоростью  $n = 250$  об/мин, или  $36 \cdot 10^4$  об/сут., длительность цикла износа составит 1240 суток, а для стали 70ХЛ – 80 суток.

Энергия зарождения и развития трещины  $E_{тр}$  характеризуется пластичностью материала:

$$E_{тр} = \frac{n^2 b^2 E}{4\pi(1-\mu) \ln\left(\frac{4R}{l}\right)} + 2E_{пн} l - \frac{\pi(1-\mu)l^2 \sigma^2}{8E} - \sigma n b l, \quad (3)$$

где  $l = \frac{2\pi a r}{360}$  – протяженность поля напряжений от вершины трещины;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости твердой частицы;  $E_{пн}$  – эффективная поверх-

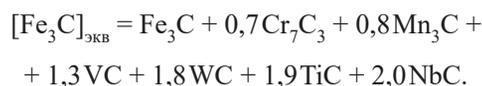
ностная энергия развития трещины;  $R$  – радиус абразивной частицы;  $l$  – расстояние между частицами, мм;  $\sigma$  – напряжение, приводящее к образованию и развитию трещины.

Энергия разрушения карбидов  $E_{рк}$  определяется из соотношения

$$E_{рк} = L_{пл} - \int_{T_{из}}^{T_{пл}} \Delta C_p dT - \int_0^{T_{из}} C_p dT, \quad (4)$$

где  $L_{пл}$  – скрытая теплота плавления при температуре изнашивания;  $T_{из}$  и  $T_{пл}$  – температуры износа и плавления, °C;  $\Delta C_p$  – разность удельных теплоемкостей в жидкости и при температуре изнашивания.

Вклад карбидной фазы в сопротивляемость разрушению оценивается по эквиваленту цементита:



Числовые коэффициенты в выражении соответствуют величине отношения энергии разрушения данного карбида и цементита. Величина износа сплавов обратно пропорциональна удельной энергии разрушения  $E_k$  карбидов. Так, если принять величину износа  $I_h$  хромистых сплавов, содержащих 15 % карбидов, и удельную энергию  $A$  разрушения карбидов  $Cr_7C_3$  за 100 %, то для остальных карбидов значения параметров  $A$  и  $I_h$  будут следующими [1, 3, 11]:

Характеристика разрушения карбидов металлов	Значение характеристики для				
	$Cr_7C_3$	VC	WC	TiC	NbC
$I_h, \%$	100	98	78	64	52
$A, \%$	100	186	256	262	286

Энергия плотности дислокаций  $E_{пд}$  оценивается выражением

$$E_{пд} = E_{пд} V_p \int_0^{l_p} f(l_p) dl_p + E_k V_k \int_0^{l_k} \phi(l_k) dl_k, \quad (5)$$

где  $E_{пд}$  и  $E_k$  – энергия плотности дислокаций соответственно в растворе матрицы и в карбидных частицах;  $V_p$  и  $V_k$  – объем раствора матрицы и карбидных частиц;  $f$  и  $\phi$  – плотности дислокаций соответственно матрицы и карбидов;  $l_p$  и  $l_k$  – протяженности участка матрицы и карбидов.

Плотность дислокаций, создаваемая при изнашивании КМ, определялась отдельно в матрице и в твердых частицах (карбидах) по формуле  $\rho = 0,2\beta^2 \cdot 10^{11}$ . Расчет прироста плотности дислокаций в каждой из фаз производится по разности между величиной плотности дислокаций на рабочей поверхности до и после изнашивания [1].

Энергия мартенситных превращений  $E_{мп}$  находится по формуле

$$E_{мп} = E_M V_M \int_0^{l_{\Delta M}} \psi(l_{\Delta M}) dl_{\Delta M}, \quad (6)$$

где  $\psi$  – коэффициент жесткости материала матрицы;  $l_{\Delta M}$  – глубина слоя, претерпевшего мартенситные превращения, мм.

По данным работ [20, 21] в наплавленном металле типа Х12Ф1 с исходной аустенитной основой в результате взаимодействия с абразивными частицами в процессе изнашивания количество мартенсита увеличивается с 9 до 75 %. В связи с разницей удельных объемов мартенсита (М) и аустенита (А), из которого образуется мартенсит, в объеме металла, охваченного превращением, возникают структурные напряжения.

Удельные объемы структурных составляющих сплавов характеризуются соотношением [6]

$$A = 0,12282 + 8,56 \cdot 10^{-6} T + 2,15 \cdot 10^{-3} C;$$

$$M = 0,12708 + 4,45 \cdot 10^{-6} T + 2,79 \cdot 10^{-3} C,$$

где  $T$  – температура, К;  $C$  – температура, °С.

Остаточные внутренние напряжения  $E_{вн}$  находятся по формуле

$$E_{вн} = \left( \frac{1-2\mu}{6E} \right) (3\sigma)^2 V_{\sigma} \int_0^{l_{\Delta\sigma}} \vartheta(l_{\Delta\sigma}) dl_{\Delta\sigma}, \quad (7)$$

где  $\sigma$  – напряжения в единичном объеме;  $\vartheta$  – коэффициент сжимаемости материала.

В основе примененной методики используется положение о том, что в кубических кристаллах при деформации относительное изменение любого межплоскостного расстояния должно быть равно относительному изменению постоянной решетки:  $\frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta a}{a}$ . Вычислив среднее значение изменений межплоскостного расстояния  $\frac{\Delta l}{l}$ , среднюю величину микронапряжений  $\sigma$  можно определить из соотношения  $\sigma = E \frac{\Delta l}{l}$  или через коэффициент сжимаемости материала [4 – 7]:  $\sigma = 3 \frac{\Delta l}{9l}$ .

Подробный расчет составляющих  $E_{км}$  приведен в работах [1, 3]. Величина износа должна быть тем меньше, чем больше энергии может поглотить КМ, не разрушаясь, и чем меньше величина энергии разрушения  $E_A$  абразивного тела. В случае, когда КМ может поглотить энергии больше того количества, которое абразивное тело передает сплаву, т.е. когда  $E_A < E_{км}$ , износ за данный цикл происходить не будет. Главная роль в увеличении энергии, затрачиваемой на разрушение, принадлежит твердым частицам, с ростом их количества возрастает твердость КМ, соответственно повышаются затраты энергии на вдавливание абразива  $E_B$ , кроме того, повышается равномерность распре-

ления дислокаций в изнашиваемом объеме. При этом будут возрастать параметры  $E_{пд}$  и  $E_B$ . Повышение износостойкости КМ с увеличением количества твердых частиц связано с их способностью к предотвращению износа матрицы вследствие полного или частичного разрушения абразивов при столкновении с карбидами.

Экономический эффект ЭШН КМ получается в результате повышения износостойкости сменных деталей вследствие упрочнения их разработанным КМ методом ЭШН [11].

Общий годовой экономический эффект состоит из суммы эффектов:

$$\mathcal{E}_{общ} = \mathcal{E}_T + \mathcal{E}_{уп} + \mathcal{E}_{кв} + \mathcal{E}_{рем}; \quad (8)$$

здесь  $\mathcal{E}_T$  – экономия на текущих расходах, руб/год;  $\mathcal{E}_{уп}$  – экономия за счет условно-постоянной части расходов, т/год;  $\mathcal{E}_{кв}$  – экономический эффект за счет экономии капитальных вложений, руб/год;  $\mathcal{E}_{рем}$  – экономия за счет сокращения затрат на ремонты, руб/год.

Экономия на текущих расходах рассчитывается по формуле

$$\mathcal{E}_T = (C_d a - C_{упр} b) n N, \quad (9)$$

где  $C_d$  и  $C_{упр}$  – стоимость деталей соответственно до и после упрочнения сплавом ТН 20, руб;  $a$  и  $b$  – число замен деталей соответственно до и после упрочнения;  $n$  и  $N$  – количество деталей в агрегате и количество агрегатов.

Стоимость процесса наплавки можно рассчитать по формуле

$$C_{напл} = C_{зв} + C_{эшн} T_{эшн} + C_{мат},$$

где  $C_{зв}$  – стоимость детали (звездочки);  $C_{эшн}$  – удельные затраты ЭШН, руб/машино-час;  $T_{эшн}$  – длительность наплавки одной детали;  $C_{мат} = m_{км} C_{км} + m_{пш} C_{пш}$  – стоимость наплавочных материалов на наплавку одной детали; здесь  $m_{км}$  – расход твердого сплава ТН 20 на одну деталь;  $C_{км}$  – стоимость 1 кг (отходов) твердых сплавов ТН 20, руб/кг;  $m_{пш}$  – расход порошковой проволоки при наплавке детали, кг;  $C_{пш}$  – стоимость 1 кг порошковой проволоки, руб/кг.

Окончательно стоимость наплавки рассчитывается по формуле

$$C_{напл} = C_{зв} + C_{эшн} T_{эшн} + m_{км} C_{км} + m_{пш} C_{пш} = 27\,473 \text{ руб/шт.}$$

Экономия на текущих расходах составит  $\mathcal{E}_T = 3\,563\,560$  руб/год.

Экономический эффект, руб/год, за счет условно-постоянной части расходов составит

$$\mathcal{E}_{уп} = P_q T_{рем} (a - b) C_{уп} N; \quad (10)$$

здесь  $P_q = 900/N$  – часовая производительность агрегата, т/ч;  $T_{рем}$  – длительность ремонта при замене одного

агрегата, ч;  $C_{уп}$  – условно-постоянная часть затрат на 1 т продукции, руб/т;  $N$  – количество агрегатов на меткомбинате;

$$\mathcal{E}_{уп} = (900/7) \cdot 8 \cdot (4 - 0,33) \cdot 102 \cdot 7 = 2\,695\,250 \text{ руб/год.}$$

Экономический эффект, руб/год, в результате экономии капитальных вложений составит

$$\mathcal{E}_{к.в} = P_{ч} T_{рем} (a - b) K_{уд.кв} E_n, \quad (11)$$

где  $K_{уд.кв}$  – удельные капвложения на 1 т продукции, руб/т;  $E_n = 0,15$  – нормативный коэффициент экономической эффективности;

$$\mathcal{E}_{к.в} = 900 \cdot 8 \cdot (4 - 0,33) \cdot 317,6 \cdot 0,15 = 1\,258\,840 \text{ руб/год.}$$

Экономический эффект в результате сокращения затрат на ремонты определится как

$$\mathcal{E}_{рем} = T_{рем} C_{уд.рем} (a - b) N; \quad (12)$$

здесь  $T_{рем}$  – длительность ремонта одного агрегата, ч;  $C_{уд.рем}$  – удельные затраты 1 норма-часа на ремонт агрегата, руб/час;

$$\mathcal{E}_{рем} = 8 \cdot 8150(4 - 0,33) \cdot 7 = 1\,675\,000 \text{ руб/год.}$$

Общий годовой экономический эффект составил

$$\mathcal{E}_{общ} = 3\,563\,560 + 2\,695\,250 + 1\,258\,840 + 1\,675\,000 = 9\,192\,650 \text{ руб/год.}$$

Годовой экономический эффект в результате упрочнения сменных деталей новыми композиционными материалами на основе твердых сплавов типа ТН 20 на предприятии составил 9 192 650 руб в год [22].

## Выводы

В результате управленческих воздействий на процесс растворимости сплава ТН 20 в матрице снизилось образование сложнлегированных структурных фаз на поверхности раздела твердая частица – матрица, что привело к повышению износостойкости КМ, а следовательно, росту эффективности металлургических агрегатов. За счет управления температурного процесса ЭШН, путем введения оптимального объема частиц ТН 20, повысилась высокотемпературная прочность и износостойкость разработанных КМ, что привело к повышению срока службы быстроизнашивающихся деталей. Управляющие воздействия на упрочнение сменных деталей позволили продлить срок их службы, повысить производительность металлургических агрегатов и снизить издержки производства готовой продукции.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Быстров В.А., Верёвкин В.А., Селянин И.Ф. Электрошлаковые технологии упрочнения композиционными материалами деталей металлургического оборудования. Изв. вуз. Черная металлургия. 2005. № 6. С. 28 – 32.
2. Композиционные материалы: Справочник / Под общ. ред. В.В. Васильева, 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2010. – 512 с.
3. Быстров В.А., Борисова Т.Н. Роль твердых частиц КМ, работающих при высокотемпературном износе // В мире научных открытий. 2014. № 8(56). С. 22 – 41.
4. Быстров В.А., Трегубова О.Г. Термодинамическая совместимость твердых частиц с матрицей КМ // Доклады АН ВШ. 2015. № 4. С. 255 – 267.
5. Aboudi J., Arnold S., Bednarczyk B. Micromechanics of Composite Materials. – Elsevier, 2013. – 984 p.
6. Brebbia C.A., Klemm A. Materials Characterizations VI: Computational Methods and Experiments. – Southampton; Boston: WIT Press. Glasgow Caledonian University, 2013. – 364 p.
7. Dvorak G. Micromechanics of Composite Materials. – Springer, 2013. – 442 p.
8. Kozłowski M., Senkara J. Nickel alloy + TiC composite layers made by oscillating electron beam // ASM Int. Eur.: Conference Weld and Join Science and Technology: Book Proc. Brussels, 2011. P. 425 – 431.
9. Kivineva E.I., Olsom D.L., Matlock D.K. Particulate reinforced metal matrix composite (TiC) as a weld deposited // Welding J. 2009. No. 3. P. 83 – 92.
10. Burggraf A.J., Winnubust A.J. Dense and porous nanostructured ceramics and composites (TiC) // Third Euro-Ceramics. 2013. Vol. 3. P. 561 – 576.
11. Трегубова О.Г., Грекова Н.Ю. Эффективность инноваций, повышающих производительность и качество металлопродукции за счет упрочнения сменных деталей. – В кн.: Научные изыскания в сфере социально-экономических и гуманитарных наук: Междисциплинарный подход и генезис знаний. – Самара: ООО «Офорт», 2017. С. 341 – 359.
12. Большаков В.И., Андрианов И.В. Асимптотические методы расчета композиционных материалов с учетом внутренней структуры. Изд. 5. – Днепропетровск: Пороги, 2008. – 197 с.
13. Быстров В.А., Грекова Н.Ю., Трегубова О.Г. Формирование рациональных программ управления ЭШП упрочнения деталей новыми КМ // Вестник СибГИУ. 2012. № 1. С. 60 – 65.
14. Верёвкин В.А., Атавин Т.А. Оптимизация процесса ЭШЛ биметаллических валков холодной прокатки // Вестник РАЕН. 2008. № 10. С. 126 – 128.
15. Каракулов В.В., Смолин И.Ю. Численная методика прогнозирования эффективных механических свойств композитов при ударном нагружении с учетом эволюции структуры // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2013. Т. 4. № 24. С. 70 – 77.
16. Whitehorse C.V. Applications in hard facing. “IIW Public Session and Metals Technology Conference”. – Sydney, 2011. 6.1/1 – 6.1/20.
17. Xidong Hui, Zhifu Wang, Benmao Sun. Study of high-temperature deformation of casting Fe-26Cr-14Ni /TiC (p) composite. – Instit. Of Materials Science, Shandong Univ. of Technology. Jinan. 2011. Vol. 19. No. 12. P. 64 – 68.
18. Walker D.M., Smith R.M. Bor, receipt, structure and properties: Materials of the 4th International Symposium on forest. – М.: Nauka, 2014. P. 32 – 44.
19. Быстров В.А., Борисова Т.Н. Борирование твердых частиц КМ // В мире научных открытий. 2015. № 2(59). С. 22 – 42.
20. Артемьев А.А. Разработка технологии ЭШН порошковой проволокой с упрочняющими частицами TiB<sub>2</sub>: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Волгоград, 2010. – 13 с.
21. Туманов А.В., Митин Б.С., Панов В.С. Исследование кинетики смачивания TiC и TiNC расплавами интерметаллидов никеля // Физическая химия. 2012. Т. 54. № 6. С. 1434 – 1437.
22. Современное предпринимательство / Под общ. ред. О.И. Кирикова. Кн. 18. – Воронеж: ВГПУ, 2007. – 320 с.

Поступила 2 февраля 2018 г.

## EFFICIENCY OF HARDENING OF METALLURGICAL EQUIPMENT SPARE PARTS BY HARD ALLOY

V.A. Bystrov

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

**Abstract.** Composite materials (CM) are widely used for hardening of wearing parts operating at high temperature wear types. They are based on high-melting hard alloys, as which are used carbides of transition metals of IV – VI groups A determining the physics of high-temperature wear. For these purposes baked TiC of TN 20 type on the basis of (Ti, Mo)C–Ni–Mo is used that has a ring structure preventing the formation of complex alloyed structures on the boundary of solid particle-matrix. Due to the minimal solubility of the sintered hard alloy of TN 20 type in the alloy-bond, at the interface of solid particle – matrix practically does not stand out complex structural phases causing embrittlement and growth of residual thermal stresses and strains. It leads to increased wear resistance and longer service life of hardened parts. In order to increase the operating efficiency of metallurgical units due to hardening of spare parts with a composite material based on sintered hard alloy of the TN 20 type using electrosag surfacing (ESW), a comprehensive program has been developed to control the efficiency of hardening parts. In the management of hard alloy surfacing the special attention is given to heat and high temperature wear resistance determined by the set of CM properties of solid particles. Therefore, maintaining of high mechanical, thermal and energy characteristics of carbides and decrease of the solubility of solid particles in a CM matrix at surfacing is a priority for improving efficiency in hardening process of spare parts. Integrated ESW management program for CM is based on effects, aimed to prevent the formation of complex alloyed structures on surface of the solid section of particle-matrix; to reduce thermal stresses and deformations (leading to the cracks formation, chipping and deleting solid particles in abrasive wear) and to improve high temperature wear resistance. Use of the developed control systems for hardening process of metallurgical equipment wearing parts has significantly increased the service life of spare parts and productivity of the metallurgical units, which ensured a certain economic effect.

**Keywords:** baked hard alloy, section boundary of solid particle-matrix, solubility of solid particles, stress relaxation.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-12-939-947

### REFERENCES

1. Bystrov V.A., Verevkin V.I., Selyanin I.F. Electrosag technology of strengthening metallurgical equipment details with composite materials. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2005, no. 6, pp. 28–32. (In Russ.).
2. *Kompozitsionnye materialy: Spravochnik* [Composite Materials: Reference book]. Vasil'ev V.V. ed. Moscow: Mashinostroenie, 2010, 512 p. (In Russ.).
3. Bystrov V.A., Borisova T.N. Role of CM solid particles, working at high temperature wear. *V mire nauchnykh otkrytii*. 2014, no. 8(56), pp. 22–41. (In Russ.).
4. Bystrov V.A., Tregubova O.G. Thermodynamic compatibility of solid particles with CM matrix. *Doklady AN VSh*. 2015, no. 4, pp. 255–267. (In Russ.).
5. Aboudi J., Arnold S., Bednarzyk B. *Micromechanics of Composite Materials*. Elsevier, 2013, 984 p.
6. Brebbia C.A., Klemm A. *Materials Characterizations VI: Computational Methods and Experiments*. Southampton; Boston: WIT Press. Glasgow Caledonian University, 2013, 364 p.
7. Dvorak G. *Micromechanics of Composite Materials*. Springer, 2013, 442 p.
8. Kozłowski M., Senkara J. Nickel alloy + TiC composite layers made by oscillating electron beam. *ASM Int. Eur.: Conference Weld and Join Science and Technology: Book Proc. Brussels*, 2011, pp. 425–431.
9. Kivineva E.I., Olsom D.L., Matlock D.K. Particulate reinforced metal matrix composite (TiC) as a weld deposited. *Welding J*. 2009, no. 3, pp. 83–92.
10. Burggraf A.J., Winnubust A.J. Dense and porous nanostructured ceramics and composites (TiC). *Third Euro-Ceramics*. 2013, vol. 3, pp. 561–576.
11. Grekova N.Yu., Tregubova O.G. Effectiveness of innovations that increase productivity and quality of metal products by spare parts hardening. In: *Nauchnye izyskaniya v sfere sotsial'no-ekonomicheskikh i gumanitarnykh nauk: Mezhdistsiplinaryni podkhod i genezis znaniy* [Socio-economic and humanitarian research: Interdisciplinary approach and knowledge genesis]. Samara: "Ofort", 2017, KM-0417, pp. 341–359. (In Russ.).
12. Bol'shakov V.I., Andrianov I.V. *Asimptoticheskie metody rascheta kompozitsionnykh materialov s uchetom vnutrennei struktury* [Asymptotic methods of composite materials design taking into account internal structure]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2008, 197 p. (In Russ.).
13. Bystrov V.A., Grekova N.Yu., Tregubova O.G. Formation of rational management programs for ESW parts hardening using new CM. *Vestnik SibGIU*. 2012, no. 1, pp. 60–65. (In Russ.).
14. Verevkin V.A., Atavin T.A. Optimization of ESR process for cold rolling bimetallic rolls. *Vestnik RAEN*. 2008, no. 10, pp. 126–128. (In Russ.).
15. Karakulov V.V., Smolin I.Yu. Numerical method for predicting effective mechanical properties of composites under shock loading, considering structure evolution. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*. 2013, vol. 4, no. 24, pp. 70–77. (In Russ.).
16. Whitehorse C.V. Applications in hard facing. *IIW Public Session and Metals Technology Conference: Sydney, 2011*. 6.1/1 – 6.1/20.
17. Xidong Hui, Zhifu Wang, Benmao Sun. Study of high-temperature deformation of casting Fe-26Cr-14Ni /TiC (p) composite. *Instit. Of Materials Science, Shandong Univ. of Technology. Jinan*. 2011, vol. 19, no. 12, pp. 64–68.
18. Walker D.M., Smith R.M. Bor, receipt, structure and properties. In: *Materials of the 4th International Symposium on forest*. Moscow: Nauka, 2014, pp. 32–44.
19. Bystrov V.A., Borisova T.N. CM solids boriding. *V mire nauchnykh otkrytii*. 2015, no. 2(59), pp. 22–42. (In Russ.).
20. Artem'ev A.A. *Razrabotka tekhnologii EShN poroshkovoi provolokoi s uprochnyayushchimi chastitsami TiB<sub>2</sub>*; *Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Development of ESW technology using powder wire with TiB<sub>2</sub> particles: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Volgograd, 2010, 13 p. (In Russ.).
21. Tumanov A.V., Mitin B.S., Panov V.S. Kinetics of wetting nickel intermetallic compounds by TiC and TiNC melts. *Fizicheskaya khimiya*. 2012, vol. 54, no. 6, pp. 1434–1437. (In Russ.).
22. *Sovremennoe predprinimatel'stvo* [Modern entrepreneurship]. Kirikov O.I. ed. Vol. 18. Voronezh: VGPU, 2007, 320 p. (In Russ.).

### Information about the author:

V.A. Bystrov, Dr Sci (Eng), Assist. Professor, Professor of the Chair "Management and Branch Economy" (bystrov39@yandex.ru)

Received February 2, 2018

УДК 669.187.26

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ ОКИСЛЕНИЯ ХРОМА В ОКСИДНО-ФТОРИДНЫХ ШЛАКАХ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ПЕРЕПЛАВЕ\*

**Левков Л.Я.<sup>1</sup>**, д.т.н., заведующий лабораторией спецэлектрOMETаллургии (LYLevkov@cniitmash.com)

**Шурыгин Д.А.<sup>1</sup>**, к.т.н., ведущий научный сотрудник (shurygind5@mail.ru)

**Дуб В.С.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор, научный руководитель ИМиМ (oms@cniitmash.ru)

**Клочай В.В.<sup>2</sup>**, к.т.н., председатель Совета директоров

**Корзун Е.Л.<sup>2</sup>**, к.т.н., доцент, начальник отдела НИОКР (e.korzun@ruspolymet.ru)

<sup>1</sup>АО «НПО «ЦНИИТМАШ»

(115088, Россия, Москва, ул. Шарикоподшипниковская, 4)

<sup>2</sup>ПАО «Русполимет»

(607010, Россия, Нижегородская обл., г. Кулебаки, ул. Восстания, 1)

**Аннотация.** Заготовки из высокохромистых сталей, обладающих комплексом необходимых механических и коррозионных свойств, широко применяются при производстве ответственных изделий тяжелого и энергетического машиностроения. Одной из наиболее эффективных технологий, получивших широкое распространение при изготовлении таких заготовок, является электрошлаковый переплав (ЭШП). Такой переплав, включенный в производственную технологическую цепочку, позволяет за счет управления процессами рафинирования и затвердевания обеспечить высокую однородность металлургических характеристик (химический состав, структуру, неметаллические включения и т.д.) металла и, в итоге, комплекс механических свойств изделия. Выбор шлака, поддержание на оптимальном уровне его окислительно-восстановительного потенциала является предпосылкой эффективного рафинирования высокохромистых сталей при ЭШП, поскольку хром и другие элементы, присутствующие в шлаке в различных степенях окисления, участвуют в транспорте кислорода из газовой фазы в жидкий металл. С позиций теории электронного строения шлаковых систем оценено влияние окисленности шлака (равновесного парциального давления кислорода  $P_{O_2}$ ) на степень окисления хрома в широко используемых в России шлаках типа АНФ-1, АНФ-6 и АНФ-29. Установлены зависимости соотношения концентраций  $Cr^{+3}/Cr^{+2}$  от температуры, окисленности и оптической основности шлака. Представлена термодинамическая модель изменения степени окисления хрома в шлаке в зависимости от его окисленности. Выполнено сравнение расчетных результатов с экспериментальными данными для шлаковых систем при температуре 1873 К. Показано, что средняя степень окисления хрома уменьшается с ростом температуры, понижением парциального давления кислорода и оптической основности шлака. Показано, что присутствие фтора в шлаке влияет на изменение соотношения  $Cr^{+3}/Cr^{+2}$ . Продемонстрировано, что с понижением парциального давления кислорода от  $10^{-4}$  до  $10^{-12}$  Па при температуре 1873 К средняя величина степени окисления хрома во фторидно-оксидных шлаках уменьшается от +3 до +2. Предложена зависимость, позволяющая оценить соотношение  $Cr^{+3}/Cr^{+2}$  во фторидно-оксидных шлаках, учитывающая температуру и окисленность шлака.

**Ключевые слова:** степень окисления, парциальное давление кислорода, электрошлаковый переплав, оптическая основность шлака, электроотрицательность.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-948-956

### ВВЕДЕНИЕ

Современные и перспективные изделия для энергетике, машиностроения, газо- и нефтехимии должны обеспечивать высокий уровень свойств и надежность при эксплуатации в экстремальных условиях. Выполнение этих условий требует разработки и использования

в промышленности сложнолегированных композиций стали. Широкое распространение получили стали с содержанием хрома от 9 до 25 % феррито-мартенситного и феррито-аустенитного классов. Значительную роль при изготовлении заготовок ответственных металлоизделий играет электрошлаковый переплав (ЭШП), обеспечивающий необходимые характеристики химического состава, структуры, неметаллических включений и, в итоге, комплекс механических свойств металла за счет эффективного управления процессами рафинирования и затвердевания [1, 2].

Повышение содержания и степени окисления (СО) железа, хрома и других 3d-переходных металлов в шлаке, сопровождающее его окислительное воздействие на металл, может приводить к окислению легирующих элементов, повышению содержания кислорода и не-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Соглашения о предоставлении субсидии на выполнение прикладных научных исследований по теме «Разработка методов управления физической, химической и структурной однородностью слитка в условиях циклического ЭШП и конкурентной ресурсосберегающей технологии изготовления заготовок для тепловой, атомной энергетике и нефтегазового комплекса» (уникальный идентификатор ПНИЭР: RFMEFI57916X0134).

В работе принимали участие Г.И. Матыцина, Ж.К. Каширина (АО «НПО «ЦНИИТМАШ»).

металлических включений в формирующемся слитке, изменению физико-химических и технологических свойств шлака, вызывая развитие химической неоднородности слитка [3 – 5]. Поэтому важной предпосылкой совершенствования технологии ЭШП является исследование влияния термодинамических параметров (температуры и окисленности), а также состава шлака, отражаемого синтетическим параметром его оптической основности, на степень окисления хрома.

### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Хром, железо и другие переходные металлы, у которых *d*- или *f*-оболочки частично заполнены электронами не только в нейтральном атоме, но и в каких-либо СО, могут быть представлены в расплаве катионами различных зарядовых состояний. Зачастую при оценке средней степени окисления исследователи прибегают к использованию отношения содержания элемента в одной СО к его содержанию в другой СО, например,  $\text{Cr}^{+3}/\text{Cr}^{+2}$ ,  $\text{W}^{+4}/\text{W}^{+6}$  и т.д. [6 – 9].

В работах [6, 10, 11] активность оксида элемента, нецелочисленная величина стехиометрического коэффициента которого определяется химическим анализом, используется в качестве характеристики окисленности шлака.

В работе [4], посвященной управлению составом шлака при ЭШП крупных слитков, предложили модель, в которой мерой окисленности шлака служила сумма содержаний оксидов элементов (хрома и марганца) переменной СО в шлаке. Такой выбор сделан на основе представлений о влиянии легкоокисляющихся поливалентных легирующих элементов на парциальное давление ( $P_{\text{O}_2}$ ) кислорода в шлаке [12, 13]. Результаты расчета в ряде случаев демонстрируют рост содержания оксидов хрома и марганца в шлаке, который не сопровождается увеличением содержания кислорода в слитке. В связи с этим для совершенствования технологии ЭШП хромистых сталей важен учет не только содержания в шлаке элементов с переменной СО, участвующих в переносе кислорода из газовой фазы в жидкий металл, но также необходимо учитывать основность шлака и величину  $P_{\text{O}_2}$ , совокупно определяющих степень окисления этих элементов [7, 14].

Экспериментальные исследования [7 – 10, 15 – 17] посвящены поведению хрома в шлаковых расплавах при температурах 1723 – 1923 К в широком диапазоне величин  $P_{\text{O}_2}$ . Результаты этих работ показывают, что хром существует в шлаке в различных СО (+2, +3, +6), а наиболее устойчивой из них для условий большинства плавильных агрегатов является степень окисления +3, соответствующая оксиду  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . По данным работ [9, 17] значение СО +6 обнаруживается в шлаках при существенно окислительных условиях, когда параметр  $P_{\text{O}_2}$  превышает  $10^{-2}$  Па. Такие условия не характерны для ЭШП. При температурах сталеплавиль-

ных процессов в восстановительных условиях, в том числе наблюдаемых при электрошлаковом переплаве, хром существует также в СО  $\text{Cr}^{+2}$  [7, 9, 17]. Данные работ [17, 18] позволяют предположить, что наиболее вероятными значениями степени окисления хрома в шлаке при электрошлаковом переплаве являются +3 и +2 с различным соотношением  $\text{Cr}^{+3}/\text{Cr}^{+2}$ .

Несмотря на заметный интерес к поведению хрома в шлаках, исследования систем с высоким содержанием соединения  $\text{CaF}_2$  представлены недостаточно полно. В работе [18] исследованы активности оксида хрома  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в шлаках систем  $\text{CaF}_2\text{--CaO--Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{CaF}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--Cr}_2\text{O}_3$  при ЭШП сплавов системы Pt–Cr. Показано, что значительное влияние на активность соединения  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  оказывают основность и температура расплава, однако величину  $P_{\text{O}_2}$  и среднюю степень окисления хрома в шлаке не контролировали. Вместе с тем последний параметр относится к числу важных термодинамических характеристик шлакового расплава.

Согласно данным работы [7] при повышении основности шлака (отношения концентраций основных и кислых оксидов) равновесие реакции  $2\text{Cr}^{+3} + \text{Cr}^0 = 3\text{Cr}^{+2}$  сдвигается вправо при фиксированном значении  $P_{\text{O}_2}$ . Однако в работе [19] отмечается обратная тенденция. Отмеченная неопределенность, вероятно, связана с различием способов и численных коэффициентов, присваиваемых амфотерным оксидам при расчете величины основности шлака. При амфотерном характере оксидов наблюдаются разнонаправленные эффекты их присутствия в сложных шлаковых системах. Например, согласно работам [20, 21] при превышении 10 – 15 % содержания оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в шлаке глинозем перестает показывать слабоосновные свойства и проявляет нейтральные, хотя, согласно работам [7, 9, 22], присутствие этого соединения в оксидных шлаках приводит к повышению степени окисления хрома.

Представления о коллективной электронной системе шлака, основанные на квантово-механических расчетах плотности распределения электронов, впервые выполненные Л. Пуулингом [23] и впоследствии модифицированные в работах [24 – 26], позволяют определить оптическую основность ( $\Lambda$ ) шлака с использованием параметров электроотрицательности их компонентов. Подобный подход исключает неопределенность, связанную с описанием поведения амфотерных соединений и комплексных катионов, состав которых довольно произвольно трактуется исследователями.

В работах [19, 27 – 29] учет электроотрицательности катионов с переменной степенью окисления успешно использовался для описания эффекта кислородопроницаемости шлаков, в том числе оксидно-фторидных. Показано, что фактором, определяющим соотношение потоков кислорода на границах с газовой средой и ванной жидкого металла, является присутствие в шлаке элементов (Fe, Cr, Ti и др.) с переменной степенью

окисления. В исследовании [24] этот подход успешно использован для определения сульфидных емкостей шлаков. Параметр  $\Lambda$  является средней арифметической величиной оптических основностей его компонентов. В общем виде для оксидно-фторидного шлака справедливо соотношение:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^m X_i \lambda_i = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i \frac{v_i k_i P_i}{M_i}}{\sum_{i=1}^m \frac{v_i k_i P_i}{M_i}}, \quad (1)$$

где  $\lambda_i$  – величина оптической основности чистого оксида или фторида элемента  $i$ ;  $v_i$  – СО элемента с номером  $i$ ;  $k_i$  – количество атомов элемента  $i$  в химической формуле стехиометрического оксида или фторида с эквивалентной долей  $X_i$ ;  $P_i$  – массовый % элемента  $i$ ;  $M_i$  – молекулярная масса оксида или фторида элемента  $i$ ;  $m$  – общее количество элементов, оксиды и фториды которых учтены в расчете.

Согласно работе [23] величина  $\lambda_i$  определяется электроотрицательностью ( $\chi_i$ ) элемента  $i$ :

$$\lambda_i = \frac{1}{1,36(\chi_i - 0,26)}. \quad (2)$$

Этот безразмерный параметр химического элемента, характеризующий его влияние на изменение плотности электронного поля при взаимодействии с другими элементами, связан с базовыми параметрами квантовой механики. Многообразие формул расчета электроотрицательности элементов [24] определяется выбором для их построения различных энергетических характеристик элементов, непосредственно определяемых спектральными методами (ковалентным, ионным или атомным радиусом, эффективным зарядом ядра, количеством валентных электронов, ионизационным потенциалом, энергией диссоциации бинарных соединений, координационным окружением атома или непосредственно электронной плотностью).

Конфигурация электронного строения атома хрома предопределяет его переменную степень окисления, поэтому для исследования поведения хрома в шлаке представляется перспективным использование основных положений теории электронного строения конденсированных фаз [30], рассматривающих шлак как фазу с коллективной электронной системой.

Приведенный обзор публикаций показал, что исследование СО хрома в шлаках представляет заметный интерес, а для фторидно-оксидных шлаковых систем информация практически отсутствует.

#### МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Для оценки средней СО хрома используем расчет активности компонентов шлака как химических эле-

ментов с учетом атомных коэффициентов активности. Выбор химических элементов в качестве компонентов шлаковой фазы делает более строгим ее термодинамическое описание, что особенно существенно в отношении элементов с переменной СО.

Учет «электронной» составляющей химического потенциала  $i$ -го элемента в шлаке приводит [6, 11, 15, 30] к следующему выражению для коэффициента его распределения ( $l_i$ ) между металлом и шлаком:

$$l_i = \frac{a'_i}{a_{[i]}} = x_{(i)} \psi_{(i)} P_{O_2}^{v_i/4}, \quad (3)$$

где  $x(i)$  и  $\psi(i)$  – атомные доля и коэффициент активности  $i$ -го элемента в шлаке.

Атомный коэффициент активности можно определить по следующему соотношению:

$$\psi_i = \left[ \sum_{j=1}^k x_j \exp\left(\frac{-\xi_{ij}}{RT}\right) \right]^{-1}; \quad (4)$$

здесь  $\xi_{ij} = \frac{1}{2}(\sqrt{\kappa_i} - \sqrt{\kappa_j})^2$  – энергия обмена местами атомов  $i$  и  $j$ ;  $\kappa_i$  и  $\kappa_j$  – энергетические параметры элементов  $i$  и  $j$ , кДж/г-атом;  $k$  – общее количество элементов.

Величина  $v_i$  является разностью между числом электронов в исходном атоме (его порядковым номером в Периодической системе) и средним числом электронов на уровнях атомов рассматриваемого элемента в шлаке. Она определяется природой элемента, температурой и положением уровня Ферми ( $\mu$ ) [6, 11]:

$$v_i = v_i^{\max} - s_i + \sum_{j=1}^{s_i} f(E_{ij}) = v_i^{\max} - s_i + \sum_{j=1}^{s_i} \left[ 1 + \exp\left(\frac{\mu - E_{ij}}{RT}\right) \right]^{-1}, \quad (5)$$

где  $v_i^{\max}$  – максимальное целочисленное значение СО элемента  $i$ ;  $s_i$  – число энергетических уровней с изменяющейся заселенностью;  $R = 8,31$  Дж/(К·моль) – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура расплава, К;  $f(E_{ij})$  – функция Ферми-Дирака, отражающая распределение электронов по состояниям (уровням) с различной энергией.

Поскольку максимальная величина СО хрома ( $i$  – это Cr) в шлаковых расплавах  $v_i^{\max} = +6$  [7 – 9, 17] равна числу его энергетических уровней с изменяющейся заселенностью  $s_i = 6$  ( $4s^1, 3d^1, \dots, 3d^5$ ), соотношение (5) сводится к виду

$$v_{Cr} = \sum_{n=1}^6 \frac{1}{1 + e^{\frac{\mu - E_{Cr_f}}{RT}}}. \quad (6)$$

Учитывая исключение хрома из правила В.М. Ключковского [31] о распределении электронов на орбиталях в многоэлектронных атомах, предполагая близость  $3d^5$  и  $3d^4$  энергетических уровней, принимая, что стандартный химический потенциал кислорода в шлаке не зависит ( $\mu_{(0)}^O = \text{const}$ ) от химического состава последнего, имеем:

$$E_{Cr4s^1} = \mu_{(0)}^O - \frac{1}{4} RT \ln P'_{O_2}, \quad (7)$$

$$E_{Cr3d^5} = E_{Cr3d^4} = \mu_{(0)}^O - \frac{1}{4} RT \ln P''_{O_2}. \quad (8)$$

Значения параметров  $P'_{O_2}$  и  $P''_{O_2}$  для энергетических уровней  $4s$  и  $3d$  можно найти, используя соотношение (4):

$$P'_{O_2} = \frac{x_O \Psi_O}{I'_O}, \quad P''_{O_2} = \frac{x_O \Psi_O}{I''_O}, \quad (9)$$

причем, согласно работе [15],

$$\lg I'_O = \frac{66\,686}{T} + 0,83, \quad \lg I''_O = \frac{63\,777}{T} - 0,71. \quad (10)$$

Атомные доли элементов и коэффициенты их активности в шлаках ЭШП можно вычислить, используя эмпирические значения атомных параметров элементов, которые представлены ниже:

Атомный параметр	Значение $x_i$ [30]
Ca	117
F	854
O	619
Al	481
Si	389
Mn	289
Fe	444
S	791
P	385
Cr	230
Mg	485

Соотношение (6) после преобразований с учетом уравнений (7), (8) и принятых допущений приобретает вид

$$v_{Cr} = \frac{2}{1 + \left(\frac{P''_{O_2}}{P'_{O_2}}\right)^{1/4}} + \frac{1}{1 + \left(\frac{P'_{O_2}}{P'_{O_2}}\right)^{1/4}}. \quad (11)$$

Расчет термодинамических параметров  $P'_{O_2}$ ,  $P''_{O_2}$  позволяет, используя выражение (11), определить среднюю степень окисления ( $v_{Cr}$ ) хрома в шлаке на основании

измерений величины  $P_{O_2}$ . Допущение о статистически наиболее вероятных СО хрома в шлаке +3 и +2 в характерных для ЭШП стали условиях ( $P_{O_2} \ll 10^{-2}$  Па) приводит к приближенной оценке  $v_{Cr}$  через отношение этих СО:

$$v_{Cr} = 3 - \frac{Cr^{+2}}{Cr^{+3} + Cr^{+2}} = 3 - \frac{1}{\frac{Cr^{+3}}{Cr^{+2}} + 1}. \quad (12)$$

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С целью проверки адекватности термодинамической модели изменения степени окисления хрома в зависимости от парциального давления кислорода проведены расчеты с использованием уравнения (11). Оценку адекватности выполнили методом сопоставления дисперсий отклонений откликов модели от среднего значения откликов системы с помощью критерия  $F$  Фишера [32]. На рис. 1 представлены экспериментальные данные исследований [7, 9, 22] (кривые 1–3 соответственно), обработанные методом наименьших квадратов, а также результаты расчетов, выполненных вышеописанным способом (кривые 4–6 соответственно), касающиеся зависимости величины отношения  $Cr^{+3}/Cr^{+2}$  от  $P_{O_2}$ . Рассчитанный критерий Фишера для кривых 1–6 превышает табличные значения величины  $F$  (уровень значимости 0,05) не менее, чем в девять раз, что позволяет считать модель значимой.

Расхождение расчетных и экспериментальных значений соотношения  $Cr^{+3}/Cr^{+2}$  во всех случаях не превысило 1,3 %, что, учитывая значительные погрешности при определении степени окисления методами химического анализа, можно считать приемлемым результатом исследований. Параметры этих зависимостей (рис. 1) сведены в табл. 1.

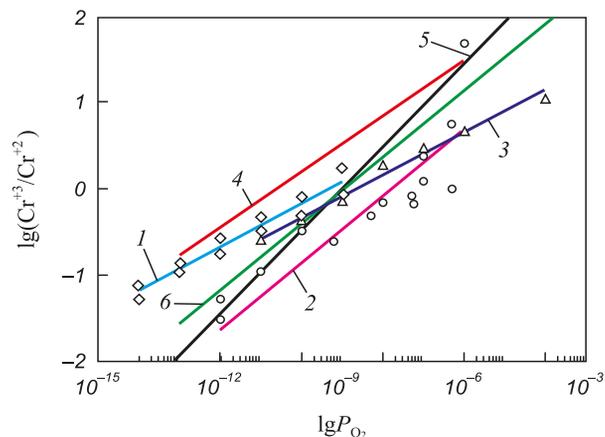


Рис. 1. Влияние окисленности шлака на соотношение  $Cr^{+3}/Cr^{+2}$  в шлаковых расплавах при температуре 1873 К по данным работ: 1 – [7]; 2 – [22]; 3 – [9]; 4 – [7]; 5 – [22]; 6 – [9]

Fig. 1. Influence of slag oxidation on the  $Cr^{+3}/Cr^{+2}$  ratio in melted slags at 1873 K according to the research works: 1 – [7]; 2 – [22]; 3 – [9]; 4 – [7]; 5 – [22]; 6 – [9]

Т а б л и ц а 1

Параметры экспериментальных (кривые 1 – 3) и расчетных (кривые 4 – 6) зависимостей соотношения СО хрома в оксидных шлаках от  $P_{O_2}$ :  $\lg\left(\frac{Cr^{+3}}{Cr^{+2}}\right) = A \lg P_{O_2} + B$

Table 1. Parameters of experimental (1 – 3) and calculated (4 – 6) dependences of the ratio of chromium oxidation degree in oxide slag from  $P_{O_2}$ :  $\lg\left(\frac{Cr^{+3}}{Cr^{+2}}\right) = A \lg P_{O_2} + B$

Кривая	$R^2$	$A$	$B$	$\sigma$
1	0,95	0,251	2,345	0,113
4	0,98	0,324	3,443	0,386
2	0,84	0,389	3,031	0,416
5	0,86	0,485	4,369	0,111
3	0,99	0,247	2,142	0,058
6	0,81	0,387	3,469	0,053

Пр и м е ч а н и е.  $R^2$  – коэффициент корреляции;  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение.

Достоверность модели, устанавливающей зависимость степени окисления хрома в шлаке от величины  $P_{O_2}$ , и соответствие расчетных результатов экспериментальным данным, представленным выше, демонстрируют возможности приближенных расчетов термодинамических параметров хрома в шлаках.

Результаты расчета параметров  $P'_{O_2}$ ,  $P''_{O_2}$  по соотношению (9) для широко применяемых при ЭШП оксидно-фторидных шлаков марок АНФ-1, АНФ-6, АНФ-29

и оксидных шлаков, составы которых взяты из работ [7, 9, 22], представлены в табл. 2.

Анализ табл. 2 показывает, что вариация расчетных значений параметров  $P'_{O_2}$  и  $P''_{O_2}$  в диапазоне химического состава шлаков ЭШП по ГОСТ 30756 – 2001 не выходит за пределы одного порядка. Относительная ошибка расчета средней степени окисления хрома не превышает 2,9 %, что можно считать приемлемым в практическом отношении. Учитывая сложность разделения  $Cr^{+2}$  и  $Cr^{+3}$  при химическом анализе шлаков ЭШП с относительно низким содержанием хрома, предложенный способ можно использовать для приближенной оценки средней величины СО хрома в шлаке на основании данных измерения параметра  $P_{O_2}$ . Применение описанной методики оценки величины  $v_{Cr}$  (соотношение  $Cr^{+3}/Cr^{+2}$ ) к оксидно-фторидным шлакам показывает (рис. 2) заметное отклонение экспериментальных данных по оксидным шлаковым системам от расчетных кривых, построенных для фторидно-оксидных шлаков.

Такой результат, по-видимому, можно объяснить изменением энергии обмена положениями компонентов при переходе от оксидного расплава к оксидно-фторидному, поскольку  $\kappa_F = 854$  кДж/г-атом  $>$   $\kappa_O = 619$  кДж/г-атом [30].

Вероятно, этот же эффект фиксирует различие величины оптической основности оксидных и оксидно-фторидных шлаков на 12 – 30 % (см. ниже). Результаты расчета оптической основности для различных шлаков с использованием шкалы Л. Поулинга [23] и данных работ [7, 9, 22] по уравнениям (1) – (3) и методике, изложенной в работе [29], представлены ниже:

Т а б л и ц а 2

Результаты расчета параметров  $P'_{O_2}$  и  $P''_{O_2}$  оксидных и фторидно-оксидных шлаков при температуре 1873 К

Table 2. Results of calculation parameters  $P'_{O_2}$  and  $P''_{O_2}$  of oxide and oxide-fluoride slags at temperature at 1873 K

№	Марка шлака	Содержание компонентов, % (по массе)*							$P'_{O_2}$ , Па	$P''_{O_2}$ , Па
		CaF <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	FeO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
1	АНФ-1	97,8	1,0	0,5	0,5	–	0,1	0,1	$2,34 \cdot 10^{-17}$	$3,59 \cdot 10^{-11}$
2	АНФ-1	90,0	5,0	2,8	2,0	–	0,1	0,1	$9,46 \cdot 10^{-17}$	$1,45 \cdot 10^{-10}$
3	АНФ-1	89,3	5,0	3,0	2,5	–	0,1	0,1	$1,09 \cdot 10^{-16}$	$1,67 \cdot 10^{-10}$
4	АНФ-6	68,3	5,0	25,0	1,5	–	0,1	0,1	$2,12 \cdot 10^{-17}$	$3,24 \cdot 10^{-11}$
5	АНФ-6	66,3	5,0	27,0	1,5	–	0,1	0,1	$1,71 \cdot 10^{-17}$	$2,62 \cdot 10^{-11}$
6	АНФ-6	62,3	8,0	27,0	2,5	–	0,1	0,1	$8,87 \cdot 10^{-18}$	$1,36 \cdot 10^{-11}$
7	АНФ-29	45,0	25,5	14,5	12,3	2,5	0,1	0,1	$4,86 \cdot 10^{-19}$	$7,47 \cdot 10^{-13}$
8	АНФ-29	40,9	27,4	15,5	13,0	3,0	0,1	0,1	$2,44 \cdot 10^{-19}$	$3,75 \cdot 10^{-13}$
9	АНФ-29	34,8	29,0	16,5	14,5	5,0	0,1	0,1	$1,02 \cdot 10^{-19}$	$1,52 \cdot 10^{-13}$
10	[7]	–	47,5	4,8	47,5	–	–	–	$7,68 \cdot 10^{-20}$	$1,18 \cdot 10^{-13}$
11	[9]	–	50,8	–	46,2	–	–	3,0	$5,61 \cdot 10^{-20}$	$8,62 \cdot 10^{-14}$
12	[22]	–	43,6	11,1	39,4	5,9	–	–	$1,65 \cdot 10^{-20}$	$2,54 \cdot 10^{-14}$

Пр и м е ч а н и е. \* – здесь и далее химический состав шлака представлен сочетанием оксидов и фторидов, обычно приводимым в протоколах химического анализа без учета отклонений от стехиометрического состава.

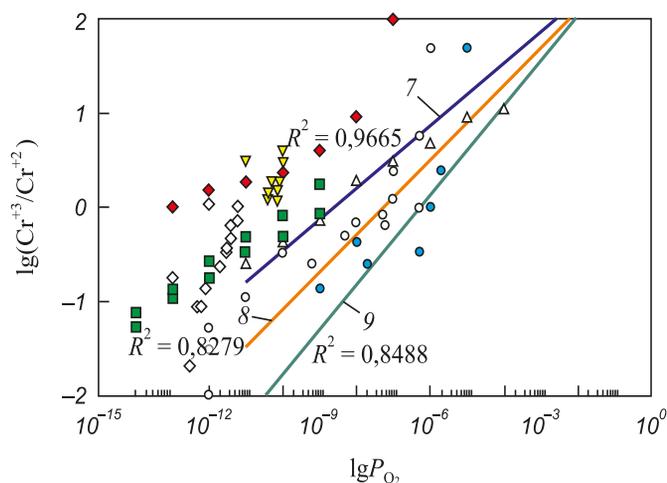


Рис. 2. Влияние окисленности шлака на соотношение  $Cr^{+3}/Cr^{+2}$  в шлаковых расплавах:

7 – АНФ-29; 8 – АНФ-6; 9 – АНФ-1;

экспериментальные данные:

■ – [7]; △ – [9]; ◆ – [15]; ◇ – [16]; ▼ – [33]; ● – [34]; ○ – [22]

Fig. 2. Influence of slag oxidation on  $Cr^{+3}/Cr^{+2}$  ratio in melted slags:

7 – ANF-29; 8 – ANF-6; 9 – ANF-1; experimental data:

■ – [7]; △ – [9]; ◆ – [15]; ◇ – [16]; ▼ – [33]; ● – [34]; ○ – [22]

№ п/п из табл. 2	2	5	8	10	11	12
Λ	0,46	0,50	0,59	0,66	0,67	0,67

На рис. 3 показано влияние оптической основности шлаков (см. выше) на изменение отношения  $Cr^{+3}/Cr^{+2}$ . Величина этого соотношения уменьшается с понижением парциального давления кислорода и оптической основности шлака.

Анализ соотношений (3), (10) – (12) с учетом оцененной выше погрешности определения параметров позволяет установить зависимость соотношения  $Cr^{+3}/Cr^{+2}$  от температуры и окисленности шлака. Для фторидно-оксидного шлака марки АНФ-6 эта зависимость может быть выражена следующим соотношением:

$$\lg\left(\frac{Cr^{+3}}{Cr^{+2}}\right) = 0,32(\pm 0,01) \lg P_{O_2} + \frac{4650}{T} - 0,15(\pm 0,02). \quad (13)$$

Результаты исследований подтвердили, что во фторидно-оксидных шлаках, как и в оксидных [7 – 9, 15 – 17, 21, 22, 33, 34], с ростом температуры, понижением парциального давления кислорода и оптической основности шлака увеличивается доля хрома со степенью окисления +2. Понижение степени окисления хрома и железа в шлаке препятствует транспорту кислорода из газовой фазы в металлическую ванну, что является условием сохранения легирующих элементов, уменьшения содержания неметаллических включений и открывает перспективы совершенствования технологий раскисления.

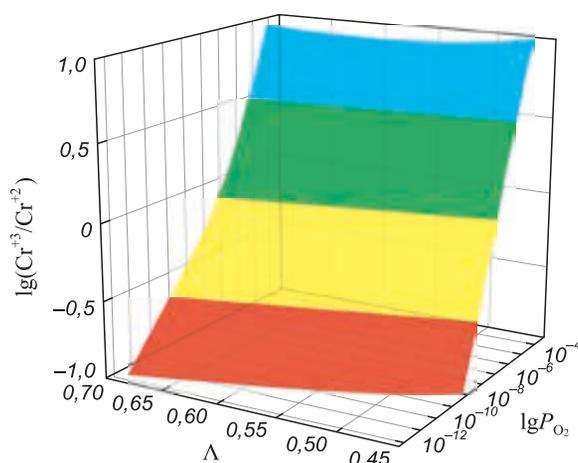


Рис. 3. Влияние оптической основности и окисленности шлака на отношение  $Cr^{+3}/Cr^{+2}$  в шлаковых расплавах

Fig. 3. Influence of the optical basicity and oxidation of slag on the ratio  $Cr^{+3}/Cr^{+2}$  in melted slags

### Выводы

Развитие ряда положений теории электронного строения шлаковых систем, разработка ее практических приложений и методик расчета позволили оценить влияние равновесного парциального давления кислорода на степень окисления хрома в оксидных и фторидно-оксидных расплавах. Подтверждено, что средняя величина СО хрома уменьшается с ростом температуры, снижением парциального давления кислорода и оптической основности шлака. Полученные для фторидно-оксидных шлаковых расплавов численные расчетные характеристики СО хрома в основном согласуются с имеющимися экспериментальными данными по оксидным шлаковым системам. Вместе с тем впервые показано, что присутствие фтора в шлаке влияет на соотношение концентраций  $Cr^{+3}/Cr^{+2}$  предположительно вследствие изменения энергии обмена компонентов при переходе от оксидного к фторидно-оксидному расплаву. Показано, что с понижением парциального давления кислорода от  $10^{-4}$  до  $10^{-12}$  Па при температуре 1873 К средняя величина СО хрома во фторидно-оксидных шлаках уменьшается от +3 до +2. Понижение средней степени окисления хрома в шлаке затрудняет транспорт кислорода из газовой фазы в металлическую ванну, обеспечивая условия сохранения легирующих элементов и уменьшения содержания неметаллических включений в наплавляемом слитке. Установленные зависимости могут служить обоснованием выбора шлакового режима и технологии раскисления в практике ЭШП.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kern T.-U., Scarlin B., Zeiler G. etc. The European COST536 project for the development of new high temperature rotor materials // Proc. 17th IFM. 2008. 1081 p.

2. Принципиальная технология производства новой наноструктурированной коррозионностойкой дуговой стали / К.Н. Уткина, А.Г. Баликов, Л.Я. Левков, В.С. Дуб и др. – В кн.: Сб. докладов 19-й Конференции молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам. – Подольск: АО ОКБ «ГИДРО-ПРЕСС», 2017. С. 351 – 359.
3. Mitchell A., Reyes-Carmona F., Wei C.-H. Deoxidation in the Electroslag Process // Proc. of 39th Electric Furnace Conference. 1981. P. 103 – 107.
4. Reitz J., Maurischat M., Friedrich B. Optimized control of slag chemistry for the electroslag remelting of large size ingots // Proc. of IFM. 2008. P. 28 – 36.
5. Hernandez-Morales B., Mitchell A. Review of mathematical models of fluid flow, heat transfer and mass transfer in electroslag remelting process // Ironmaking and Steelmaking. 1999. Vol. 26. No. 6. P. 423 – 438.
6. Пономаренко А.Г., Иноземцева Е.Н. О валентности металлов в окисдных и солевых расплавах. – В кн.: Научные сообщения 4-й Всесоюзной конференции по строению и свойствам металлических и шлаковых расплавов. – Киев: Наук. Думка, 1980. Ч. 3. С. 67 – 70.
7. Павлов А.В. Физико-химические свойства поливалентных элементов в расплавах и разработка энергоресурсосберегающих металлургических технологий: Автореф. дис. д.т.н. – М., 2002. – 48 с.
8. Bartie N.J. The effects of temperature, slag chemistry and oxygen partial pressure on the behaviour of chromium oxide in melter slags // University of Stellenbosch. 2004. 137 p.
9. Jahanshahi S., Sun S., Zhang L. Recent developments in physico-chemical characterisation and modelling of ferroalloy slag systems // 10th Int. Ferroalloys Congress INFACON. South Africa. February. 2004. P. 316 – 332.
10. Mikelsons J. Degree of oxidation of iron in  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{FeO}_n$  slag melts as a Function of the oxygen partial pressure of the gas phase // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1982. Vol. 53. No. 6. P. 251 – 265.
11. Храпко С.А. Термодинамическая модель системы металл – шлак для АСУ и машинных экспериментов по оптимизации технологии сталеплавильного процесса: Автореф. дис. к.т.н. – Донецк, 1990. – 24 с.
12. Митчелл А., Этьен М. Угар титана в процессе электрошлакового переплава // Электрошлаковый переплав. 1971. Вып. 2. С. 161 – 169.
13. Biele H., Pateisky G., Fleischer H.J. The Reactions of Titanium and Silicon with  $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{CaF}_2$  Slags in the ESR Process // Journal of Vacuum Science and Technology. 1972. Vol. 9. No. 6. P. 1318 – 1321.
14. Левков Л.Я. Теоретические предпосылки и практические методы управления физико-химическими и теплофизическими процессами при электрошлаковом переплаве, определяющие качество ответственных изделий: Автореф. дис. д.т.н. – М., 2016. – 45 с.
15. Окоукони П.И. Разработка элементов САПР технологии плавки стали: Автореф. дис. к.т.н. – Донецк, 1993. – 19 с.
16. Xiao Y., Holappa L. Slags in ferroalloys production-review of present knowledge // The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. 2004. August. P. 437 – 439.
17. Schwerdtfeger K., Mirzayousef-Jadid A. Redox Equilibria of Chromium in Calcium Silicate Base Melts // Proc. of the Belton Symposium. 2000. AIME. ISS. P. 108 – 119.
18. Mohanty A., Kay A. Activity of chromic oxide in the  $\text{CaF}_2 - \text{CaO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$  and  $\text{CaF}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Cr}_2\text{O}_3$  systems // Metal. Trans. B. 1975. Vol. 6. P. 159 – 166.
19. Lijun Wang, Seshadri Seetharaman. Experimental Studies on the Sulphide Capacities of  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{CrO}_x$  Slags // Metallurgical and Materials Transactions B. 2010. Vol. 41. Issue 2. P. 367 – 373.
20. Yan B., Zhang J., Song Q. Thermodynamic behaviour of transition metal (Cr, Ti, Nb, V) oxides in molten slags // Proc. of «MOLTEN – 2009», Chile. 2009. Chapter 1. P. 309 – 317.
21. Morita K., Sano N. Activity of chromium oxide in  $\text{CaO} - \text{SiO}_2$  based slags at 1873 K // VII Int. Conf. on Molten Slags Fluxes and Salts (South Africa). 2004. P. 113 – 117.
22. Morita K., Inoue A., Takayama N., Sano N. The solubility of  $\text{MgO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$  in  $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{CaO}$  slag at 1600 °C under reducing conditions // Tetsu-to-Hagane. 1988. Vol. 74. No. 6. P. 999 – 1005.
23. Паулинг Л. Природа химической связи. – М., Л.: Госхимиздат, 1947. – 440 с.
24. Mendeleev 0.4.3 documentation – <http://mendeleev.readthedocs.io/en/stable/data.html#electronegativity> (Дата обращения: 12.03.2018 г.).
25. Li Keyan, Xue Dongfeng Estimation of electronegativity values of elements in different valence states // J. of Physical Chemistry A. 2006. Vol. 110. Issue 39. P. 11332–11337.
26. Черкасов А.Р., Галкин В.И., Зуева Е.М., Черкасов Р.А. Концепция электроотрицательности. Современное состояние проблемы // Успехи химии. 1998. № 67 (5). С. 423 – 441.
27. Wegman Dwight D., Investigation into critical parameters which determine the oxygen refining capability of the slag during electroslag remelting of alloy 718: theses and dissertations // Wegman Dwight D. 1993. 180 p.
28. Лакомский В.В., Григоренко Г.М. Подход к оценке основности шлакового расплава в системе газ – шлак – металл // Современная электрометаллургия. 2009. № 2. С. 48, 49.
29. Поволоцкий Д.Я. Физико-химические основы процессов производства стали: Учеб. пособие для вузов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 183 с.
30. Рудненко Т.Б., Пономаренко А.Г., Иноземцева Е.Н. и др. Термодинамическая оценка распределения элементов между шлаковой и металлической фазами в процессе ЭШП // Проблемы специальной электрометаллургии. 1987. № 4. С. 15 – 21.
31. Клечковский В.М. Распределение атомных электронов и правило последовательного заполнения (n + 1)-груп. – М.: Атомиздат, 1968. – 432 с.
32. Коновалов Ю.В. Статистическое моделирование с использованием регрессионного анализа: Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Компьютерное и статистическое моделирование». – М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 73 с.
33. Pei W., Wijk O. Experimental study on the activity of chromium oxide in the  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}_{\text{sat.}} - \text{CrO}_x$  slag // Scand. J. Metallurgy. 1994. Vol. 23. P. 228 – 235.
34. Morita K., Mori M., Sano N. etc. Activity of chromium oxide and phase relations for the  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{CrO}_x$  system at 1873 K under moderately reducing conditions // Steel Research. 1999. No. 8-9. P. 319 – 324.

Поступила 2 ноября 2018 г.

## STUDY OF THE OXIDATION DEGREE OF CHROMIUM IN OXIDE-FLUORIDE SLAGS FOR ESR

L.Ya. Levkov<sup>1</sup>, D.A. Shurygin<sup>1</sup>, V.S. Dub<sup>1</sup>, V.V. Klochai<sup>2</sup>,  
E.L. Korzun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC Russian State Research Center “RPA “CNITMASH”, Moscow, Russia

<sup>2</sup>JSC “Ruspolimet”, Kulebaki, Nizhny Novgorod Region, Russia

**Abstract.** Billets from high-chromium steels possessing the necessary complex of mechanical and corrosion properties are widely used in the manufacture of critical products of heavy and power engineering. One of the effective technologies widely used in the manufacture of such work-pieces is electroslag remelting (ESR). ESR, included in the production process chain, for the management of refining and solidification processes allows to ensure a high homogeneity of metallurgical characteristics (chemical composition, structure, non-metallic inclusions, etc.) of the metal and, as a result, the complex of mechanical properties of the product. The choice of slag, maintaining its optimum oxidation-reduction potential at an optimum level, is a prerequisite for the effective refining of high-chromium steels at the ESR, since chromium and other elements present in the slag in various oxidation degree participate in the transport of oxygen from the gas phase to the liquid metal. From standpoint of the theory of electronic structure of slag systems, the effect of slag oxidation (equilibrium partial pressure of oxygen  $P_{O_2}$ ) on the oxidation degree of chromium has been studied for widely used slags in Russia such as ANF-1, ANF-6, and ANF-29. Dependence of the ratio of  $Cr^{+3}/Cr^{+2}$  concentrations on the temperature, oxidation level and optical slag basicity is established. A thermodynamic model of changing the oxidation state of chromium in slag depending on its oxidation is presented. The calculated results are compared with the experimental data for slag systems at a temperature of 1873 K. It is shown that the average oxidation degree of chromium decreases with increasing temperature, decreasing of the oxygen partial pressure and the optical slag basicity. The presence of fluorine in the slag affects the variation ratio  $Cr^{+3}/Cr^{+2}$ . It is shown that with decrease in the oxygen partial pressure from  $10^{-4}$  to  $10^{-12}$  Pa at a temperature of 1873 K, the average value of chromium oxidation degree in fluoride-oxide slags decreases from +3 to +2. A correlation is proposed, which makes it possible to estimate the  $Cr^{+3}/Cr^{+2}$  ratio in fluoride-oxide slags, taking into account the temperature and oxidation of slag.

**Keywords:** oxidation degree, partial oxygen pressure, electroslag remelting, optical slag basicity, electronegativity.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-948-956

## REFERENCES

1. Kern T.-U., Scarlin B., Zeiler G. etc. The European COST536 project for the development of new high temperature rotor materials. *Proc. 17th IFM*. 2008, 1081 p. 2.
2. Utkina K.N., Balikoev A.G., Levkov L.Ya., Dub V.S. etc. Principal technology of production of a new nanostructured corrosion-resistant duplex steel. In: *Sb. dokladov: 19-ya Konferentsiya molodykh spetsialistov po yadernym energeticheskim ustanovkam, 13 aprelya 2017g., Podol'sk* [19th Conference of Young Specialists on Nuclear Power Plants on April, 13, 2017, Podolsk]. AO OKB “GIDRO-PRESS”, Podol'sk, 2017, pp. 351–359. (In Russ.).
3. Mitchell A., Reyes-Carmona F., Wei C.-H. Deoxidation in the electroslag process. *Proc. of 39th Electric Furnace Conference*. 1981, pp. 103–107.
4. Reitz J., Maurischat M., Friedrich B. Optimized control of slag chemistry for the electroslag remelting of large size ingots. *Proc. of IFM*. 2008, pp. 28–36.
5. Hernandez-Morales B., Mitchell A. Review of mathematical models of fluid flow, heat transfer and mass transfer in electroslag remelting process. *Ironmaking and Steelmaking*. 1999, vol. 26, no. 6, pp. 423–438.
6. Ponomarenko A.G., Inozemtseva E.N. On the valence of metals in oxide and salt melts. In: *Nauchnye soobshcheniya 4-i Vsesoyuz. konf. po stroeniyu i svoistvam metallicheskih i shlakovykh rasplavov* [Scientific Reports of the 4th All-Union. Conf. on the structure and properties of metallic and slag melts]. Part. 3. 1980, pp. 67–70. (In Russ.).
7. Pavlov A.V. *Fiziko-khimicheskie svoystva polivalentnykh elementov v rasplavakh i razrabotka energoresursosbergayushchikh metallurgicheskikh tekhnologii: dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Physicochemical properties of polyvalent elements in melts and development of energy-resource-saving metallurgical technologies]. Moscow, 2002, 351 p. (In Russ.).
8. Bartie N.J. *The effects of temperature, slag chemistry and oxygen partial pressure on the behaviour of chromium oxide in melter slags*. University of Stellenbosch, 2004, 137 p.
9. Jahanshahi S., Sun S., Zhang L. Recent developments in physico-chemical characterisation and modelling of ferroalloy slag systems. In: *10th Int. Ferroalloys Congress INFACON. South Africa. February 2004*, pp. 316–332.
10. Mikelsons J. Degree of oxidation of iron in  $SaO-SiO_2-FeO_n$  slag melts as a function of the oxygen partial pressure of the gas phase. *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1982, vol. 53, no. 6, pp. 251–265.
11. Khrapko S.A. *Termodinamicheskaya model' sistemy metall-shlak dlya ASU i mashinnykh eksperimentov po optimizatsii tekhnologii staleplavil'nogo protsessa: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Thermodynamic model of the metal-slag system for automatic control systems and machine experiments on optimization of the technology of the steelmaking process]. Donetsk: DPI, 1990, 81 p. (In Russ.).
12. Mitchell A., Et'en M. Titanium losses in the process of electroslag remelting. In: *Elektroshlakovyy pereplav* [Electroslag remelting]. Issue. 2. Moscow: Metallurgiya, 1971, pp. 161–169. (In Russ.).
13. Biele H., Pateisky G., Fleischer H.J. The reactions of titanium and silicon with  $Al_2O_3-CaO-CaF_2$  slags in the ESR process. *Journal of Vacuum Science and Technology*. 1972, vol. 9, no. 6, pp. 1318–1321.
14. Levkov L.Ya. *Teoreticheskie predposylki i prakticheskie metody upravleniya fiziko-khimicheskimi i teplofizicheskimi protsessami pri elektroshlakovom pereplave, opredelyayushchie kachestvo otvetsvennykh izdelii: dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Theoretical prerequisites and practical methods of controlling physical-chemical and thermo-physical processes in electroslag remelting, which determine the quality of critical products]. Moscow, 2016, 339 p. (In Russ.).
15. Okoukoni P.I. *Razrabotka elementov SAPR tekhnologii plavki stali: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of CAD elements for steel melting technology]. Donetsk: DPI, 1993, 168 p. (In Russ.).
16. Xiao Y., Holappa L. Slags in ferroalloys production-review of present knowledge. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2004, August, pp. 437–439.
17. Schwerdtfeger K., Mirzayousef-Jadid A. Redox Equilibria of Chromium in Calcium Silicate Base Melts. In: *Proc. of the Belton Symposium*. 2000. AIME ISS, pp. 108–119.
18. Mohanty A., Kay A. Activity of chromic oxide in the  $CaF_2-CaO-Cr_2O_3$  and  $CaF_2-Al_2O_3-Cr_2O_3$  systems. *Metal. Trans. B*. 1975, vol. 6, pp. 159–166.
19. Lijun Wang, Seshadri Seetharaman. Experimental Studies on the Sulphide Capacities of  $CaO-SiO_2-CrO_x$  Slags. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2010, vol. 41, Issue 2, pp. 367–373.
20. Yan B., Zhang J., Song Q. Thermodynamic behaviour of transition metal (Cr, Ti, Nb, V) oxides in molten slags. In: *Proc. of “MOL-TEN – 2009”, Chile. 2009. Chapter 1*, pp. 309–317.

21. Morita K., Sano N. Activity of chromium oxide in CaO-SiO<sub>2</sub> based slags at 1873 K. In: *VII Int. Conf. on Molten Slags Fluxes and Salts (South Africa)*, 2004, pp. 113–117.
  22. Morita K., Inoue A., Takayama N., Sano N. The solubility of MgO-Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-CaO slag at 1600 °C under reducing conditions. *Tetsu-to-Hagane*. 1988, vol. 74, no. 6, pp. 999–1005.
  23. Pauling L. *The Nature of the Chemical Bond*. Cornell University Press, USA, 1967. (Russ. ed.: Pauling L. *Priroda khimicheskoi svyazi*. Moscow – Leningrad: Goskhimizdat, 1947, 440 p.).
  24. *Mendeleev 0.4.3 documentation*. Electronic resource. Available at URL: <http://mendeleev.readthedocs.io/en/stable/data.html#electronegativity> (Accessed 12.03.2018.)
  25. Keyan, Xue Dongfeng. Estimation of electronegativity values of elements in different valence states. *J. of Physical Chemistry A*. 2006, vol. 110, Issue 39, pp. 11332–11337.
  26. Cherkasov A.R., Galkin V.I., Zueva E.M., Cherkasov R.A. The concept of electronegativity. The current state of the problem. *Russian Chemical Reviews*. 1998, vol. 67, no. 5, pp. 375–392.
  27. Wegman Dwight D. *Investigation into critical parameters which determine the oxygen refining capability of the slag during electroslag remelting of alloy 718: theses and dissertations: Dr. Tech. Sci. Diss.* 1993, 180 p.
  28. Lakomskii V.V., Grigorenko G.M. Approach to evaluation of the basicity of slag melt in gas-slag-metal system. *Sovremennaya elektrometallurgiya*. 2009, no. 2, pp. 48–49. (In Russ.).
  29. Povolotskii D.Ya. *Fiziko-khimicheskie osnovy protsessov proizvodstva stali: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Physicochemical foundations of steel production processes: A manual for universities]. Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGU, 2006, 183 p. (In Russ.).
  30. Rudnenko T.B., Ponomarenko A.G., Inozemtseva E.N. etc. Thermodynamic evaluation of the distribution of elements between slag and metal phases in the process of ESR. *Problemy spetsial'noi elektrometallurgii*. 1987, no. 4, pp. 15–21. (In Russ.).
  31. Klechkovskii V.M. *Raspredelenie atomnykh elektronov i pravilo posledovatel'nogo zapolneniya (n + l)-grupp* [Distribution of atomic electrons and the rule of successive filling of (n + l)-groups]. Moscow: Atomizdat, 1968, 432 p. (In Russ.).
  32. Konovalov Yu.V. *Statisticheskoe modelirovanie s ispol'zovaniem regressionnogo analiza: Metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu kursovoi raboty po distsipline "Komp'yuternoe i statisticheskoe modelirovanie"* [Statistical modeling using regression analysis: Methodical instructions for the execution of the course work on the discipline "Computer and Statistical Modeling"]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2013, 73 p. (In Russ.).
  33. Pei W., Wijk O. Experimental study on the activity of chromium oxide in the CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO<sub>sat.</sub>-CrO<sub>x</sub> slag. *Scand. J. Metallurgy*. 1994, vol. 23, pp. 228–235.
  34. Morita K., Mori M., Sano N. etc. Activity of chromium oxide and phase relations for the CaO-SiO<sub>2</sub>-CrO<sub>x</sub> system at 1873 K under moderately reducing conditions. *Steel Research*. 1999, no. 8-9, pp. 319–324.
- Acknowledgements.** G.I. Matytsina, J.K. Kashirina (JSC "RPA TsNIIT-MASH") participated in the research.
- The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the framework of the Agreement on the provision of subsidies for the implementation of applied scientific research on the theme "Development of methods for managing physical, chemical and structural homogeneity of an ingot in a cyclical ESR and competitive resource-saving technology for the manufacture of billets for thermal and nuclear energy and oil and gas complex" (The unique identifier of PNIER: RFMEFI57916X0134).
- Information about the authors:**
- L. Ya. Levkov**, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Special Electrometallurgy (LYLevkov@cniitmash.com)
- D.A. Shurygin**, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher (shurygind5@mail.ru)
- V.S. Dub**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Scientific Director of the Institute of Metallurgy and Mechanical Engineering (oms@cniitmash.ru)
- V.V. Klochai**, Cand. Sci. (Eng.), Chairman of Board of Directors
- E.L. Korzun**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of R & D Department (e.korzun@ruspolymet.ru)

Received April 18, 2018

УДК 669.15-198

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НИКЕЛЯ И ЖЕЛЕЗА ИЗ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО СИЛИКАТНОГО РАСПЛАВА В ПРОЦЕССЕ БАРБОТАЖА. СООБЩЕНИЕ 3. ВОССТАНОВИТЕЛЬ – КОНВЕРТИРОВАННЫЙ ГАЗ\*

**Вусихис А.С.<sup>1</sup>**, к.т.н., старший научный сотрудник (vas58@mail.ru)  
**Леонтьев Л.И.<sup>2,3,4</sup>**, академик РАН, советник, д.т.н., профессор, 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.** Известный способ переработки окисленных никелевых руд включает подачу руды в противотоке с высокотемпературными отходящими газами, плавку в барботажной зоне двухзонной печи, подачу углеродсодержащего топлива и кислородсодержащего дутья и получение расплава, который восстанавливается твердым восстановителем в плазменной зоне при нагреве азотом. Основной недостаток этого способа – низкое содержание никеля в сплаве, наличие кремния, углерода, хрома и других примесей. Для повышения качества ферроникеля предложено в плазменной зоне использовать конвертированный природный газ, который при обработке плазмой будет являться не только теплоносителем, но и восстановителем. Методом термодинамического моделирования, в основе которого лежит допущение о том, что при барботаже ванны с расплавом состав газа в достигших поверхности всплывающих пузырьках близок к равновесному, описаны процессы совместного восстановления никеля и железа в системе 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>, близкой по составу к магнезиальным никелевым рудам. Газ-восстановитель получен в результате кислородной конверсии природного газа с коэффициентом расхода ( $\alpha$ ) 0,25, 0,35 и 0,50 (при температуре 1823 К). В результате проведенных расчетов выявлены зависимости содержания оксидов никеля и железа в силикатном расплаве, степени их восстановления, кратности шлака и содержания никеля в сплаве от общего расхода газа, определяемого как произведение количества газа в единичной порции на количество расчетных циклов, а также количества никеля и железа, восстановленных единичной порцией газа. Независимо от доли водорода и оксида углерода в исходных газах увеличение их расхода монотонно снижает содержание оксида никеля в расплаве, в то время как содержание оксида железа первоначально возрастает, а затем – снижается. При продувке расплава продуктами конверсии природного газа с  $\alpha = 0,25$  процесс восстановления протекает за счет водорода, влияние СО незначительно. Расход 54 м<sup>3</sup>/т газа позволяет достигнуть степени восстановления никеля 98,5 %, содержания оксида никеля в расплаве 0,028 %, кратности шлака 46 единиц. При одинаковом расходе газа с увеличением в исходной смеси долей СО<sub>2</sub> и Н<sub>2</sub>O за счет повышения  $\alpha$  ухудшаются показатели восстановления металлов из расплава: значения  $C_{NiO}$  и  $C_{FeO}$  и кратность шлака повышаются, а степени восстановления никеля и железа снижаются. Сравнение результатов с ранее полученными данными по восстановлению металлов из аналогичных расплавов оксидом углерода и водородом показало, что большей эффективностью обладает водород, несколько хуже показатели при использовании конвертированного газа с  $\alpha = 0,25$ . Восстановление никеля конвертированным газом ( $\alpha = 0,35$ ) до степени восстановления 88 %, что соответствует его расходу 60 м<sup>3</sup>/т, происходит более эффективно, чем чистым СО. Однако конечные степени восстановления при использовании конвертированного газа достигают 90 %, в то время как при использовании СО приближаются к 100 %.

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

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-957-962

### ВВЕДЕНИЕ

Широко известная в металлургии технология плавки в жидкой ванне [1 – 4], в основе которой лежат бар-

ботажные процессы, может быть применена при получении ферроникеля из окисленных никелевых руд. На базе этой технологии разработан ряд способов, в которых плавление шихты и восстановление металлов из оксидного расплава разделены во времени и месте реализации [5 – 10]. В частности, предложен способ

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

переработки окисленных никелевых руд, включающий подачу руды в противотоке с высокотемпературными отходящими газами, плавку в барботажной зоне двухзонной печи с подачей углеродсодержащего топлива и кислородсодержащего дутья с получением расплава, который восстанавливается твердым восстановителем в плазменной зоне [11]. Основной недостаток способа – состав ферроникеля близок по составу к сплаву, полученному в электропечи [12, 13]: низкое содержание никеля, наличие кремния, углерода, хрома и других примесей.

Для повышения качества ферроникеля предлагается в плазменной зоне использовать конвертированный природный газ, который при обработке плазмой будет являться не только теплоносителем, но и восстановителем [14], так как в результате барботажа оксидного расплава восстановительными газами получают богатый ферроникель без вредных примесей [15].

Ранее методом термодинамического моделирования, в основе которого лежит допущение о том, что при барботаже глубокой ванны с расплавом состав газа во всплывающих пузырьках, достигших поверхности, близок к равновесному [16], описаны процессы совместного восстановления никеля и железа в системе, близкой по составу к магнизальным никелевым рудам, смесями CO–CO<sub>2</sub> [17] и H<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O [18]. В результате проведенных расчетов выявлены зависимости содержания оксидов никеля (C<sub>NiO</sub>) и железа (C<sub>FeO</sub>), степени их восстановления (φ<sub>Ni</sub> и φ<sub>Fe</sub>), кратности шлака и содержания никеля в сплаве (C<sub>Ni</sub>) в силикатном расплаве от общего расхода газа (M<sub>r</sub>, моль), определяемого как произведение количества газа в единичной порции (m<sub>r</sub>, моль) на количество циклов (k), а также количества никеля (n<sub>Ni</sub>) и железа (n<sub>Fe</sub>), восстановленных одной порцией газа, и содержания газов в единичной порции от номера цикла (Z).

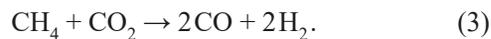
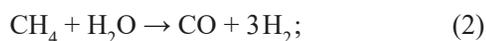
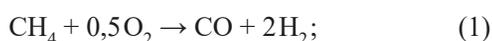
### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе приведены результаты моделирования процесса совместного восстановления никеля и железа из силикатного расплава конвертированным газом разного состава.

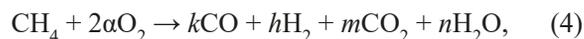
Процессы конверсии природного газа широко известны [19, 20].

По используемому окислителю выделяют следующие варианты получения конвертированных газов: кислородная конверсия, конверсия водяным паром, углекислотная конверсия.

Окисление метана (основного компонента углеводородных газов) при получении конвертированного газа протекает по следующим основным суммарным реакциям:



Для анализа выбран процесс кислородной конверсии как наименее энергетически затратный. В основу процесса положена реакция



где α – коэффициент расхода, определяемый как отношение количества кислорода, поданного на окисление углеводородов, к его количеству, необходимому для полного окисления метана до CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O по реакции CH<sub>4</sub> + 2O<sub>2</sub> → CO<sub>2</sub> + 2H<sub>2</sub>; k, h, m и n – коэффициенты, определяющие количество газов при окислении CH<sub>4</sub> при заданном значении α.

Термодинамическое моделирование проведено при температуре 1823 К, давлении 0,1 МПа, газовая фаза – конвертированный газ. Результаты приведены ниже:

Газ	α	Содержание, % (объем.)			
		CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
1	0,25	33,1	0	66,3	0
2	0,35	30,9	2,4	55,8	10,9
3	0,50	26,3	6,9	40,4	26,4

Количество газа в единичном цикле расчетов – 1 моль, а компонентов в исходном оксидном расплаве: 1 моль NiO, 10 моль FeO, 40 моль SiO<sub>2</sub>, 3 моль Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10 моль CaO, 2 моль MgO.

Анализ полученных данных показывает, что в ходе барботажа содержание оксида никеля в расплаве монотонно уменьшается, а степень восстановления увеличивается независимо от доли водорода и оксида углерода CO в исходных газах, используемых для расчетов (рис. 1). Если восстановление металлов вести смесью CO + H<sub>2</sub>, то с увеличением расхода газа содержание оксида никеля в расплаве монотонно уменьшается практически до нуля. При наличии в исходной смеси CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O равновесные значения C<sub>NiO</sub> повышаются, а степени восстановления снижаются.

Содержание оксида железа в расплаве сначала возрастает, проходит через максимум, а затем снижается (рис. 2). Константы равновесия реакций восстановления никеля водородом и оксидом углерода CO многократно больше, чем для железа. Количество металлического никеля (n<sub>Ni</sub>)<sub>1</sub>, образованного в ходе взаимодействия его оксида с единичной порцией газа, на порядок выше этих значений для железа (n<sub>Fe</sub>)<sub>1</sub>. В результате содержание оксида никеля в системе уменьшается, а оксида железа незначительно возрастает. В дальнейшем значения n<sub>Ni</sub> с ростом расхода газа монотонно уменьшаются, а n<sub>Fe</sub> – проходят через максимум. Поэтому изменение значений C<sub>NiO</sub> происходит монотонно, а C<sub>FeO</sub> – проходит через максимум. Количество восстановленных никеля и железа при обработке расплава единичной порцией газа меняются симбатно.

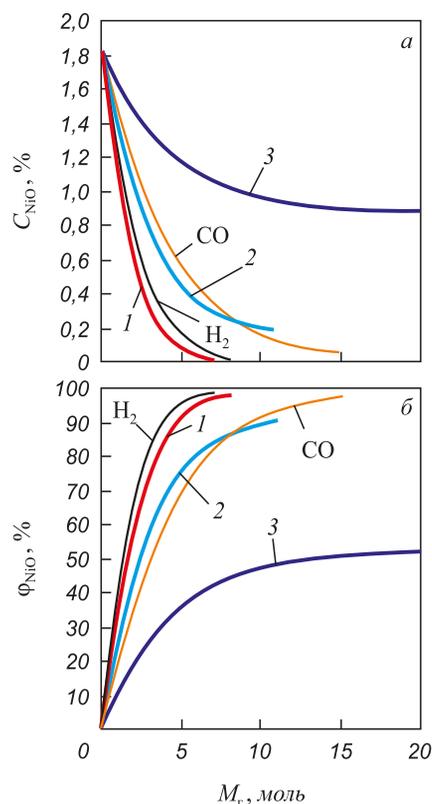


Рис. 1. Изменение содержания оксида никеля (а) и степени его восстановления (б) в расплаве в зависимости от общего расхода газа (здесь и далее номера кривых по таблице, CO [9], H<sub>2</sub> [10])

Fig. 1. Change in content of nickel oxide (a) and degree of its reduction (b) in the melt depending on total gas consumption (hereinafter, numbers of curves as are in the Table, CO [9], H<sub>2</sub> [10])

**Параметры, соответствующие завершающему циклу расчетов ( $Z_{\max}$ ) при различных составах конвертированного газа**

**Parameters corresponding to the final calculation cycle ( $Z_{\max}$ ) at different composition of the converted gas**

Показатель	Значение показателя для газа		
	1	2	3
$Z_{\max}$	8	11	21
$M_r$ , моль	8	11	21
$C_{NiO}$ , % (по массе)	0,028	0,177	0,884
$C_{FeO}$ , % (по массе)	16,89	17,29	17,44
$V$ , м <sup>3</sup> /т	54,0	74,7	142,5
$H_2^*$ , %	58,80	53,45	38,47
$H_2O^*$ , %	8,30	13,21	28,19
$CO^*$ , %	32,10	31,40	28,08
$CO_2^*$ , %	1,16	1,97	5,24
Кратность шлака	46	59	97
$C_{Ni}$ , %	65,3	78,1	87,6
$\varphi_{Ni}$ , %	98,5	90,4	51,7
$\varphi_{Fe}$ , %	5,50	2,70	0,77

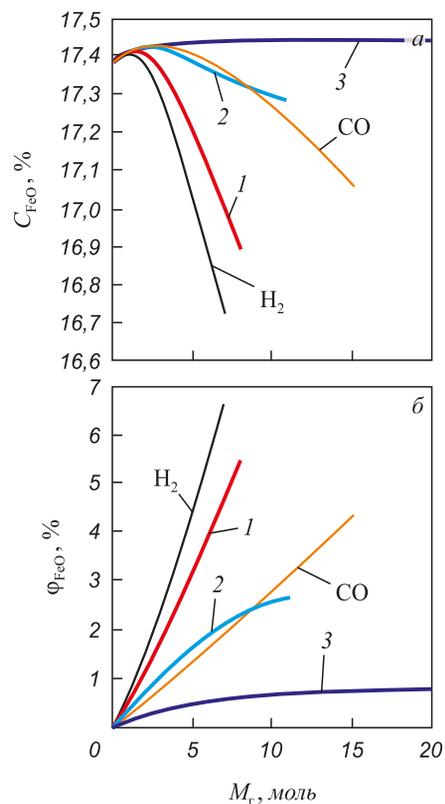


Рис. 2. Изменение содержания оксида железа (а) и степени его восстановления (б) в расплаве в зависимости от общего расхода газа

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

Общее количество металла, восстановленного единичной порцией газа, как сумма  $(n_{Ni})_1$  и  $(n_{Fe})_1$  в первом цикле имеет максимальное значение, по мере развития процесса – уменьшается. Соответственно, первоначально в отходящем газе доли CO и H<sub>2</sub> минимальны, в дальнейшем увеличиваются и приближаются к пределу (рис. 3).

Содержание никеля в образующемся металлическом сплаве монотонно уменьшается по мере увеличения количества введенного в систему газа  $M_r$  (рис. 4). Это связано с тем, что по мере развития процесса восстановления значения  $n_{Ni}$  уменьшаются, а значения  $n_{Fe}$  остаются на том же уровне. В определенный момент восстановление никеля практически полностью завершается, в то время как железо продолжает восстанавливаться. В приведенных расчетах при  $\varphi_{Ni}$ , близком к 98,5 %, величина  $\varphi_{Fe}$  не превышает 6,0 % (рис. 1, 2). Лишь после полного восстановления никеля происходит восстановление железа, что сопровождается увеличением его доли в сплаве.

По мере уменьшения значений  $C_{NiO}$  доли водорода и оксида углерода, расходуемых на взаимодействие с оксидом железа, увеличиваются.

Кратность шлака как отношение количеств оксидного расплава и металла составляет порядка 45 единиц (рис. 4). Это означает, что доля металла в системе по

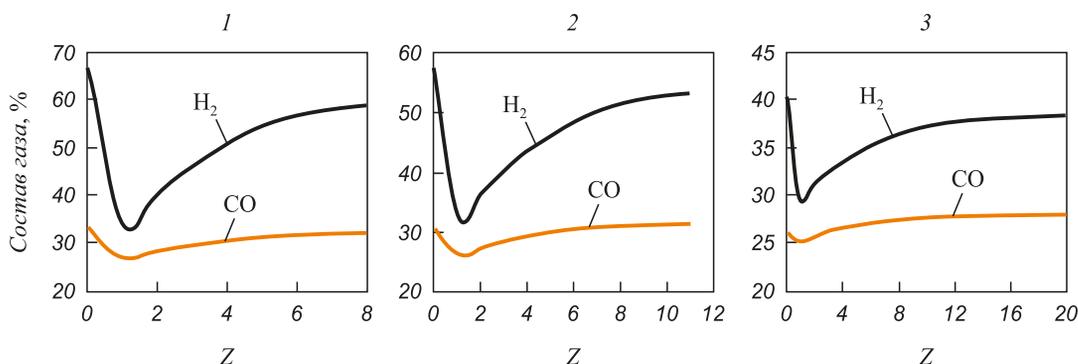


Рис. 3. Изменение содержаний  $H_2$  и  $CO$  в единичной порции по циклам обработки расплава газами 1 – 3 (по таблице)

Fig. 3. Changes in content of  $H_2$  and  $CO$  in single portion by cycles of melt treatment with gases 1 – 3 (according to the Table)

завершению процесса для представленных значений  $M_T$  не превышает 2 %.

На рис. 1, 2 и 4 для сравнения представлены значения  $C_{NiO}$ ,  $C_{FeO}$ ,  $C_{Ni}$ , соответствующие восстановлению железа и никеля водородом и оксидом углерода  $CO$  [9, 10]. Из представленных данных следует, что более эффективно восстановление металлов чистым водородом.

Параметры системы, соответствующие завершающему циклу расчетов ( $Z_{max}$ ) при различных составах конвертированного газа, представлены в таблице.

При продувке расплава продуктами конверсии природного газа при  $\alpha = 0,25$  процесс восстановления в основном осуществляется за счет водорода, влияние  $CO$  незначительно. Восстановление никеля конвертированным газом ( $\alpha = 0,35$ ) до  $\varphi_{Ni}$  около 88 % (что соответствует расходу около  $60 \text{ м}^3/\text{т}$ ) происходит более эффективно, чем чистого  $CO$ . Одинаковые показатели в первом случае достигаются при меньшем расходе газа-восстановителя, чем во втором. Дальнейшее увеличение расхода газа-восстановителя приводит к обратному эффекту. Оксид углерода  $CO$  восстанавливает лучше. Степень восстановления никеля может достигать почти 100 %, а в случае использования конвертированного газа с  $\alpha = 0,35$  едва превысит 90 %.

### Выводы

В зависимости от поставленной цели в качестве восстановительного газа может быть использован конвертированный газ различного состава, для получения которого могут быть применены различные виды твердого, жидкого или газообразного топлива. Хотя наиболее эффективно восстановление металлов из оксидных расплавов с использованием водорода, но перспективы массового использования такого газа весьма ограничены. Чем больше коэффициент расхода  $\alpha$ , тем меньше показатели степени восстановления. Полученные сведения важны для описания термоэкстракционных процессов, связанных с периодическим выводом металлической фазы и непрерывным выводом газов.

### 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. Плавка в жидкой ванне / А.В. Ванюков, В.П. Быстров, А.Д. Васкевич и др. – М.: Металлургия, 1988. – 208 с.
3. 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.
4. Лазарев В.И., Спесивцев А.В., Быстров В.П., Ладин Н.А., Зайцев В.И. Развитие плавки Ванюкова с обеднением шлаков // *Цветные металлы*. 2000. № 6. С. 33 – 36.

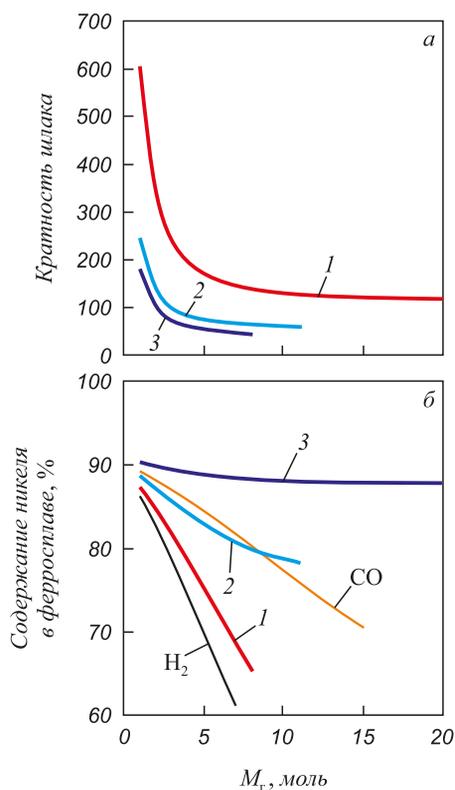


Рис. 4. Изменение кратности шлака (а) и содержания никеля в сплаве (б) в зависимости от расхода газа

Fig. 4. Change in slag ratio (a) and nickel content in the alloy (b) depending on gas consumption

5. 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.
6. Федоров А.Н., Комков А.А., Бруэк В.Н., Гнусков Н.А., Крыжановский А.П. Освоение процесса Ванюкова для переработки окисленных никелевых руд на Южно-уральском никелевом комбинате // Цветные металлы. 2007. № 12. С. 33 – 37.
7. Ковган П.А., Абуов М.Г., Едильбаев А.И. Перспективные технологии переработки бедных окисленных никелевых руд // Цветные металлы. 2008. № 2. С. 43 – 45.
8. 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.
9. 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.
10. Пахомов Р.А., Старых Р.В. Особенности плавки окисленных никелевых руд в агрегате барботажного типа. I. Термодинамический анализ плавки // Металлы. 2015. № 5. С. 3 – 14.
11. Пат. № 2064516 РФ. Способ переработки окисленных никелевых руд / Ковган П.А., Рогов П.В., Муфтахов А.С., Волков В.А., Козырев В.В., Барсуков В.В.; заявл. 13.07.1994.
12. Грань Н.И., Онищин Б.П., Майзель Е.И. Электроплавка окисленных никелевых руд. – М.: Металлургия, 1971. – 248 с.
13. Резник И.Д., Ермаков Г.П., Шнейерсон Я.М. Никель. В 3 т. Т. 2. – М.: ООО Наука и Технология, 2001. – 468 с.
14. Жиров Д.М. Применение плазменно-дугового жидкофазного восстановления металлов газами для переработки комплексного сырья // Современная электрометаллургия. 2011. № 3. С. 24 – 27.
15. Пирометаллургическая переработка комплексных руд / Л.И. Леонтьев, Н.А. Ватолин, С.В. Шаврин, Н.С. Шумаков. – М.: Металлургия, 1997. – 432 с.
16. 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.
17. Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Кудинов Д.З., Селиванов Е.Н. Особенности восстановления никеля и железа из многокомпонентного силикатного расплава при барботаже. Сообщение 1. Восстановитель – смесь CO – CO<sub>2</sub> // Изв. вуз. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 9. С. 731 – 736.
18. Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Кудинов Д.З., Селиванов Е.Н. Особенности восстановления никеля и железа из многокомпонентного силикатного расплава при барботаже. Сообщение 2. Восстановитель – смесь H<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>O // Изв. вуз. Черная металлургия. Т. 61. № 10. С. 794 – 799.
19. Кутепов А.Н., Бондарева Т.И., Беренгартен Т.И. Общая химическая технология. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 405 с.
20. Арутюнов В.С. Окислительная конверсия природного газа. – М.: Красанд, 2011. – 590 с.

Поступила 1 ноября 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 12, pp. 957–962.

## THERMODYNAMIC MODELING OF NICKEL AND IRON REDUCTION FROM MULTICOMPONENT SILICATE MELT IN BUBBLING PROCESS. REPORT 3. CONVERTED GAS AS A REDUCING AGENT

*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 of the 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 Material Sciences, Moscow, Russia

<sup>4</sup> National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

**Abstract.** Common method of oxidized nickel ores processing includes ore feeding in countercurrent with high-temperature waste gases, melting in bubbling zone of a two-zone furnace, supplying carbonaceous fuel and oxygen-containing blasting to produce melt that is reduced by solid reducing agent in plasma zone when heated with nitrogen. The main disadvantages of this method are low nickel content in alloy and presence of silicon, carbon, chromium and other impurities. To improve quality of ferronickel, it is proposed to use converted natural gas in plasma zone, which, when processed by plasma, is not only a heat carrier, but also a reducing agent. The method is based on assumption that at melt bubbling, composition of gas in bubbles that reached bath surface is close to equilibrium. Gas-reducing agent is obtained by oxygen conversion of natural gas with ratio  $\alpha$  equal to 0.25; 0.35 and 0.50 respectively ( $T = 1823$  K). Based on calculations, dependencies of content of nickel and iron oxides in silicate melt, degree of their reduction, ratio of slag and metal and nickel content in the alloy on total gas flow determined as the product of the gas amount in a single batch and the number of calculation cycles, as well as the amount of nickel and iron, reduced by a single portion of gas are revealed. Regardless of

proportion of hydrogen and carbon monoxide in source gases, increase in their consumption monotonously reduces content of nickel oxide in the melt, while content of iron oxide initially increases, and then decreases. When melt is blown with natural gas conversion products with  $\alpha = 0.25$ , reduction process takes place due to hydrogen, effect of CO is insignificant. Flow rate of 54 m<sup>3</sup>/t of gas allows to achieve 98.5 % degree of nickel reduction, content of nickel oxide in melt is 0.028 %, ratio of slag and metal is 46 units. At equal gas consumption, with increase in proportions of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O in the initial mixture, by increasing  $\alpha$ , values of metals reduction from melt deteriorate: values of  $C_{NiO}$  and  $C_{FeO}$  and ratio of slag and metal increase, and degree of nickel and iron reduction decreases. Comparison of results with previously obtained data on metals reduction from similar melts by carbon monoxide and hydrogen has shown that hydrogen has greater efficiency, somewhat worse results are demonstrated when converted gas with  $\alpha = 0.25$  is applied. Nickel reduction by converted gas ( $\alpha = 0.35$ ) to reduction rate of 88 %, which corresponds to its consumption of 60 m<sup>3</sup>/t, is more effective than by pure CO. However, final values of degree of reduction using converted gas reach 90 %, while for CO they approach 100 %.

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

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-12-957-962

### REFERENCES

1. Romenets V.A., Valavin V.S., Usachev A.B. *Protsess Romelt*. Romenets V.A. ed. Moscow: Ruda i metally, 2005, 399 p. (In Russ.)
2. Vanyukov A.V., Bystrov V.P., Vaskevich A.D. etc. *Plavka v zhidkoi vanne* [Melting in a liquid bath]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 208 p. (In Russ.)

3. 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.
  4. Lazarev V.I., Spesivtsev A.V., Bystrov V.P., Ladin N.A., Zaitsev V.I. Development of Vanyukov melting with slags depletion. *Tsvetnye metally*. 2000, no. 6, pp. 33-36. (In Russ.)
  5. Kovgan P.A., Volkov V.A., Kozyrev V.V. etc. Environment friendly technology for coke-free melting of oxidized nickel ores. *Tsvetnaya metallurgiya*. 1994, no. 11-12, pp. 16-17. (In Russ.)
  6. Fedorov A.N., Komkov A.A., Brucek V.N., Gnuskov N.A., Kryzhanovskii A.P. Mastering Vanyukov Process for oxidized nickel ores processing at the South Ural Nickel Plant. *Tsvetnye metally*. 2007, no. 12, pp. 33-37. (In Russ.)
  7. Kovgan P.A., Abuov M.G., Edil'baev A.I. Promising technologies for processing of poor oxidized nickel ores. *Tsvetnye metally*. 2008, no. 2, pp. 43-45. (In Russ.)
  8. Tsybulov L.B., Knyazev M.V., Tsemekhman L.Sh., Kudabaev E.A., Golovlev Yu.I. Analysis of various variants of technological scheme for oxidized nickel ores processing to ferronickel using Vanyukov two-zone furnace. *Tsvetnye metally*. 2010, no. 10, pp. 15-21. (In Russ.)
  9. Bystrov V.P., Fedorov A.N., Shchelkunov V.V., Bystrov S.V. Using Vanyukov process for oxidized nickel ores processing. *Tsvetnye metally*. 2011, no. 8-9, pp. 155-158. (In Russ.)
  10. Pakhomov R.A., Starykh R.V. Melting of oxidized nickel ores in a barbotage unit: I. Thermodynamic analysis of melting. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2015, no. 9, pp. 675-684.
  11. Kovgan P.A., Rogov P.V., Muftakhov A.S., Volkov V.A., Kozyrev V.V., Barsukov V.V. *Sposob pererabotki okislennykh nikelovykh rud* [Method of processing oxidized nickel ores]. Patent RF no. 2064516. (In Russ.)
  12. Gran' N.I., Onishchin B.P., Maizel' E.I. *Elektroplavka okislennykh nikelovykh rud* [Electrosmelting of oxidized nickel ores]. Moscow: Metallurgiya, 1971, 248 p. (In Russ.)
  13. Reznik I.D., Ermakov G.P., Shneerson Ya.M. *Nikel'. V 3 t. T. 2* [Nickel. In 3 vols. Vol. 2]. Moscow: OOO Nauka i Tekhnologiya, 2001, 468 p. (In Russ.)
  14. Zhirov D.M. Application of plasma-arc liquid-phase reduction of metals with gases for recycling of complex raw materials. *Sovremennaya elektrometallurgiya*. 2011, no. 3, pp. 24-27. (In Russ.)
  15. Leont'ev L.I., Vatolin N.A., Shavrin S.V., Shumakov N.S. *Pirometallurgicheskaya pererabotka kompleksnykh rud* [Pyrometallurgical processing of complex ores]. Moscow: Metallurgiya, 1997, 432 p. (In Russ.)
  16. Vusikhis A.S., Dmitriev A.N. Investigation of processes of metal oxides reduction from the melt by reducing gas in bubbled layer. *Vestnik UGTU-UPI*. 2004, no. 15 (45), p. 1, pp. 93-95. (In Russ.)
  17. 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 bibling process. Report 1. Reducing agent – a mixture of CO – CO<sub>2</sub>. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Chernaya Metallurgiya*. 2018, vol. 61, no. 9, pp. 731-736. (In Russ.)
  18. Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Kudinov D.Z., Selivanov E.N. Osobennosti Thermodynamic modeling of nickel and iron reduction from multicomponent silicate melt in bibling process. Report 2. Reducing agent – a mixture of H<sub>2</sub> – H<sub>2</sub>O. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Chernaya Metallurgiya*. 2018, vol. 61, no. 10, pp. 794-799. (In Russ.)
  19. Kutepov A.N., Bondareva T.I., Berengarten T.I. *Obshchaya khimicheskaya tekhnologiya* [General chemical technology]. Moscow: Akademkniga, 2004, 405 p. (In Russ.)
  20. Arutyunov V.S. *Okislitel'naya konversiya prirodnogo gaza* [Oxidative conversion of natural gas]. Moscow: Krasand, 2011, 590 p. (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 November 2, 2018

УДК 621.791.02

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТВЕРДОФАЗНОГО СОЕДИНЕНИЯ СПЛАВА ОТ4-1, ПОЛУЧЕННОГО ХОЛОДНОЙ ТУГОЙ ПОСАДКОЙ И ПОСЛЕДУЮЩЕЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ

**Бахматов П.В.**, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Машиностроение  
и металлургия» (mim@knastu.ru)

**Муравьев В.И.**, д.т.н., профессор кафедры «Машиностроение  
и металлургия» (vmuravyev@mail.ru)

**Фролов А.В.**, к.т.н., доцент кафедры «Промышленная электроника» (afrolov\_kms@mail.ru)

**Пицык В.С.**, аспирант кафедры «Машиностроение  
и металлургия» (BiktorSergeevich@yandex.ru)

Комсомольский-на-Амуре государственный университет «КнАГУ»  
(681013, Россия, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27)

**Аннотация.** Исследованы закономерности влияния максимальной величины деформационно-напряженного состояния, полученного в условиях холодной тугой посадки заготовок системы вал – отверстие при образовании твердофазного диффузионного соединения (ТДС) и последующем температурном воздействии в автономном вакууме, на эволюцию структурных изменений и свойства приконтактной области (ПО) неразъемного соединения сплава ОТ4-1. Показано, что в процессе холодной пластической деформации сплава при образовании ТДС в микроструктуре ПО наблюдается деформационный рельеф (следы скольжения по границам зерен), уменьшение площади контактных поверхностей и объемное взаимодействие как в плоскости контакта (искривление зерен), так и в объеме зоны контакта (очаги выхода дислокаций). Основные показатели, а именно, удельный параметр организации структуры, плотность зерен, средняя плотность границ зерен и развитость границ зерен интерфейса структурного состояния в 10, 4, 1,8 и 1,5 раза соответственно превышают таковые основного металла в исходном состоянии. Температурные воздействия в условиях автономного вакуума в интервале фазовых превращений  $\alpha \rightarrow \beta$  приводят к стадийности структурных изменений как в основном металле, так и в ПО ТДС. В первоначальный момент в микроструктуре появляется глобулярная составляющая, переходящая вновь в игольчатую структуру исходного состояния (с некоторым ростом микротвердости) при увеличении времени выдержки, а также при повышении температуры. Впервые установлено явление появления стадии образования глобулярной структуры при нагреве пластически деформированного металла не только в температурно-временных условиях фазового превращения, а и при повышенных температурах, причем чем выше температура нагрева, тем меньше время существования этой стадии. Кроме того, при меньших степенях пластической деформации стадия глобуляризации структуры наблюдается при температурах, близких к температуре полиморфных превращений  $T_m$ , и меньших выдержках. Для основного металла (степень деформации незначительная) глобулярная структура исчезает практически полностью после нагрева в течение 10 мин при 950 °С. Для деформационно-напряженного состояния холодно-деформированной ПО ТДС глобулярная структура исчезает при нагреве в течение 1 ч при 950 °С, 40 мин – при 975 °С, 20 мин – при 1000 °С. При этих температурах практически полностью завершается процесс «залечивания» несплошностей, то есть исчезает линия соединения, образуется по микроструктуре сплошной металл ПО, не отличающийся от основного металла, с незначительным увеличением микроструктуры. Количественная оценка структурных изменений по основным параметрам интерфейса структурного состояния позволяет выявить механизм, кинетику и структурную зависимость от степени пластической деформации и режимов термической обработки, обеспечивающих «залечивание» несплошностей, исчезновение границ раздела и свойства ТДС не хуже свойств основного металла.

**Ключевые слова:** структура, твердофазное соединение, тугая посадка, термическая обработка, интерфейс структурного состояния.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-963-973

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных методов получения неразъемных соединений (НС), особенно трубопроводных систем (ТС), в машиностроении (в авиа-, судо-, автомобилестроении и т.д.) является метод твердофазной диффузионной сварки [1].

Наличие переходных и разнородных зон в приконтактной области (ПО) НС характерно для наиболее распространенных методов при изготовлении ТС летательных аппаратов: аргонодуговой сварки плавлением

АрДЭС и пайки токами высокой частоты. Это связано с отличием состава, структуры и свойств сварного шва от свойств соединяемых металлов. Кроме того, указанные методы имеют ряд ограничений металлургического и технологического характера [1 – 5].

Применение традиционных методов диффузионной сварки [1, 6 – 10] позволяет исключить образование переходных и разнородных областей ПО НС, но необходимость проведения процесса сварки в вакууме существенно ограничивает номенклатуру и габаритные размеры изготавливаемых деталей и значительно уве-

личивает их стоимость (табл. 1). Получение биметаллических соединений [11, 12] при использовании традиционной схемы диффузионной сварки, основанной на одновременном наложении тепловых и деформационных полей на соединяемые элементы в условиях вакуума, и получение стыковых соединений неприемлемо для сварки в монтажных условиях. Применение переходных прослоек при использовании традиционной схемы диффузионной сварки [1, 13 – 16] создает в приконтактном материале НС гетерогенную область со структурой, составом и свойствами, отличными от характеристик основного металла (ОМ), что, как показывает опыт эксплуатации летательных аппаратов, является основной причиной потери прочности НС.

Развитие физического контакта при низкоинтенсивной диффузионной сварке, влияние технологических факторов и микроструктуры образцов на качество НС являются общеизвестными фактами. Наиболее возможным является установление количественных зависимостей между этими параметрами, а также зависимости между исходной структурой металла и качеством получаемых НС. Так, в работах [17 – 20] показано, что при использовании образцов с равноосной мелкозернистой структурой глобулярного типа при оптимальных режимах возможно получение НС с прочностью, равной или более высокой, чем у основного металла.

Заслуживает внимания разработка новых технологических приемов получения НС в твердом состоя-

нии титановых сплавов [21 – 23], предусматривающих получение НС на заготовках системы вал–отверстие из холоднопрессованной заготовки из сплава 2М2А и листовой заготовки из сплава ВТ20, основанных на их холодной тугой посадке (ТП) с последующей термической обработкой с целью обеспечения прочностных показателей не ниже показателей прочности ОМ из сплава ВТ20. Получение одной из заготовок методом порошковой металлургии обуславливает наличие в ПО НС гетерогенной области из-за существенных процессов объемного расширения при нагреве. Такой процесс близок к традиционному методу диффузионной сварки.

Целью настоящей работы являлось выявление изменения структуры и свойств ПО сплава ОТ4-1 при оптимальной холодной тугой посадке и последующей термической обработке.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Заготовки типа вал–отверстие изготавливали из сплава ОТ4-1 из плиты толщиной 10 мм на современном высокоточном токарно-винторезном станке с ЧПУ 16К20Ф3 и на вертикальном фрезерном обрабатывающем центре с ЧПУ VF-1. Длина заготовки – 10 мм; наружный диаметр (*D*) заготовки типа вал 8,88 мм; диаметр отверстия (*d*) второй заготовки 8,88 мм.

Холодную запрессовку образцов выполняли на испытательной машине Instron 3382 с постоянной ско-

Т а б л и ц а 1

### Ограничения по применению традиционных методов получения НС в твердом состоянии при изготовлении ТС

Table 1. Restrictions on use of traditional methods of SJ obtaining in solid state in PS manufacturing

Технологические ограничения	Способ сварки												
	Холодная	Взрывом	Магнитноимпульсная	Вакуумно-термич. магнитноимп.	Электрическим разрядом в жидкости	Ударная	Индукционная	Ультразвуковая	Трение	Прокаткой в вакууме	Термокомпрессионная	Сварка взрывающихся прослоев	Диффуз. в вакууме и защит. средах
По типам получаемых соединений	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+	-
По габаритам заготовок	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Сложность, дороговизна оборудования	-	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+
Невозможность использования в монтажных условиях	+	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+
Длительность процесса	-	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+
Оценка возможности использования при получении НС ТС ЛА из титановых сплавов, %	40	-	30	20	-	-	50	50	40	-	-	-	50

ростью 5 мм/мин. Исследованию структуры и свойств ПО НС подвергали заготовки, полученные в условиях холодной тугой посадки при оптимальном натяге 450 мкм (установленном ранее в работе [24]) как после запрессовки, так и после термической обработки в различных режимах в автономном вакууме с использованием геттера (титановой стружки).

Исследования микроструктуры проводили на шлифах, изготовленных по стандартной методике: раскрой и нарезка на прецизионном станке IsoMet1000 и абразивном станке AbraseMet250; шлифование, полирование образцов – на станке EcoMet250 с полуавтоматической насадкой AutoMet250 с использованием традиционных алмазных кругов и паст. Травление поверхности проводили в реактиве: 68 мл глицерина, 16 мл плавиковой кислоты, 16 мл азотной кислоты. Время травления составляло 15 – 25 с. Микроструктуру оценивали на оптическом микроскопе Nikon MA200 и на растровом электронном микроскопе Hitachi S3400-N.

Исходя из последних достижений в области физической мезомеханики [25, 26], объясняющих динамическое поведение материала при деформации (упрочнении), необъяснимое с позиции теории дислокаций, при исследовании структурных изменений использовали компьютерную металлографию [27]. При этом количественные характеристики микроструктуры определяли путем обработки оцифрованных изображений в программе Image-ProPlus [27], основными (определяющими интерфейс структурного состояния) из которых являлись:

– удельный периметр границ зерен ( $q_{уд}$ ) или развитость границ зерен:

$$q_{уд} = \frac{\sum P_i}{F_{\phi}}$$

где  $P_i$  – периметр  $i$ -го зерна, мкм;  $F_{\phi}$  – площадь поверхности металлографического шлифа, зафиксированной на обрабатываемом снимке, мкм<sup>2</sup>;

– средняя плотность границ зерен ( $q_{ср}$ ):

$$q_{ср} = \frac{P_{ср}}{F_{\phi}} = \frac{\sum P_i}{\sum F_i}$$

где  $P_{ср}$  – средний периметр по всем зернам, зафиксированным на обрабатываемом изображении, мкм;  $F_{ср}$  – средняя площадь по всем зернам, зафиксированным на обрабатываемом изображении, мкм<sup>2</sup>;

– плотность зерен ( $q$ ):

$$q = \frac{n}{F_{\phi}}$$

где  $n$  – количество зерен, зафиксированных на обрабатываемом изображении, шт.;

– удельный параметр организации структуры ( $q_c$ ):

$$q_c = \frac{Q_c}{F_{\phi}}$$

где  $Q_c = \sum i = N \left( \frac{P_i D_i}{2F_i} \right)$  – параметр организации структуры;  $D_i$  – фрактальная размерность границы отдельного зерна.

Измерение микротвердости проводили на микротвердомере Shimadzu HMV-2 при величине нагрузки на индентор 0,9807 Н согласно схеме (рис. 1). Испытания на выпрессовку проводили на испытательной машине Instron 3382, имитирующей испытание на срез цельных образцов по ГОСТ Р 50076 – 92.

Определение температуры полиморфного превращения проводили на dilatометре DLL402PC при нагреве цельных образцов из сплава ОТ4-1 диам. 5 мм, длиной 20 мм со скоростью 5 °С/мин до температуры 1050 °С в среде аргона.

Для выявления внутренних и сквозных дефектов в материале приконтактного объема НС и определения степени его герметичности использовали стандартные методы неразрушающего контроля: радиографический

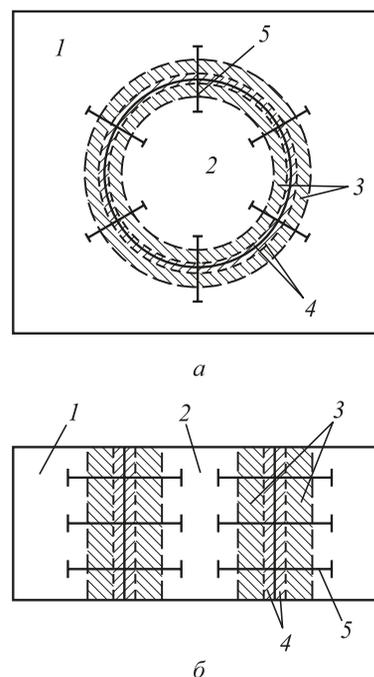


Рис. 1. Схема измерения микротвердости материала ПО НС, полученного в условиях тугой посадки по периметру соединения (а) и по толщине образца (б):

1 и 2 – основной металл охватывающей и охватываемой заготовки; 3 – переходная область материала ПО НС; 4 – область измельченной микроструктуры материала ПО НС; 5 – участки проведения измерений

Fig. 1. Diagram of measurement of microhardness of CA of solid joint (SJ) of material obtained in conditions of forced fit along the joint perimeter (a) and along the sample thickness (b):

1 and 2 – base metal of covering and covered blank; 3 – transition area of CA of solid joint; 4 – area of crushed microstructure of CA of solid joint of the material; 5 – measurement sites

контроль по ГОСТ 7512 – 82 и капиллярную дефектоскопию по ГОСТ 18442 – 80.

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

В исходном состоянии (рис. 2, а, 3) структура основного металла и металла твердофазного диффузионного соединения после оптимальной холодной тугой посад-

ки существенно различаются. Холодная пластическая деформация, обусловленная движением дислокаций, всегда приводит к образованию на поверхности характерного рельефа – следов скольжения как по границам зерен, так и в их объеме. На рис. 3 видно развитие деформационного рельефа ПО: следы скольжения по границам зерен, сближение контактных поверхностей и объемное взаимодействие как в плоскости контакта,

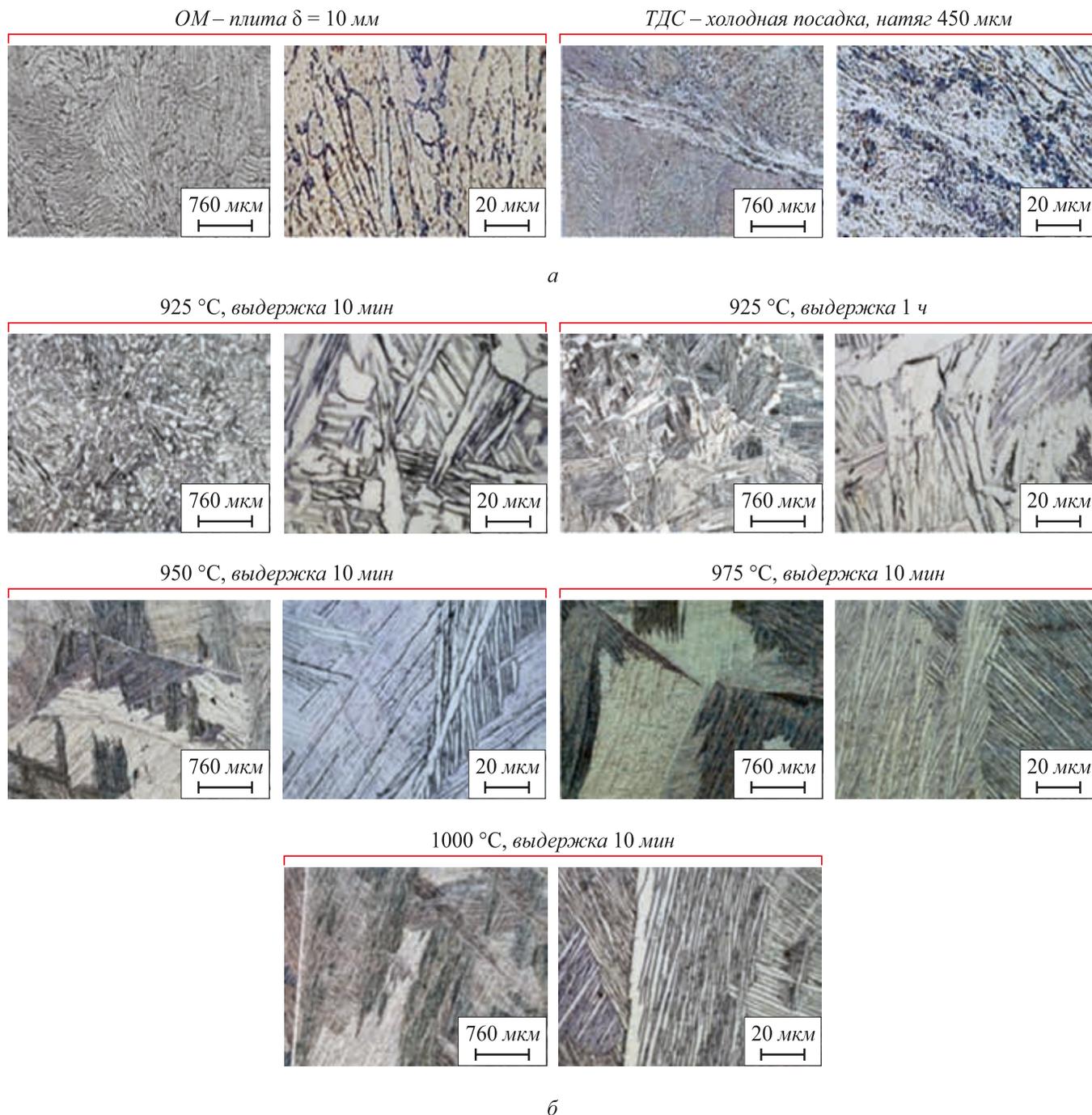
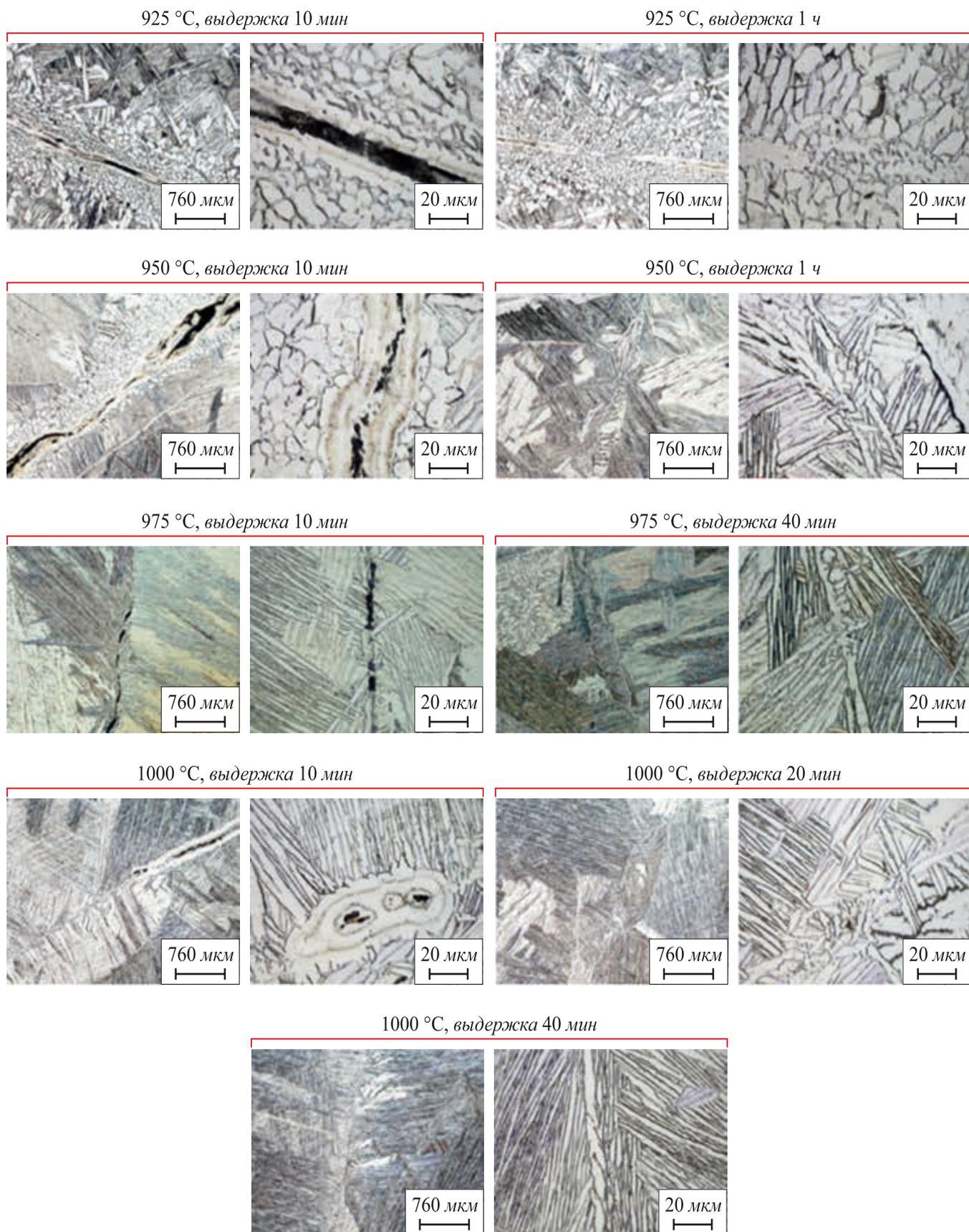


Рис. 2. Изменение микроструктуры образцов в зависимости от температуры и времени выдержки при термической обработке в автономном вакууме:  
а – исходное состояние ОМ и ТДС (холодная посадка с натягом 450 мкм); б – ОМ после ТО; в – ТД после ТО

Fig. 2. Changes in microstructure of the samples depending on temperature and exposure time during heat treatment in autonomous vacuum:  
а – initial state of BM and SDB (cold forced fit of 450 microns); б – BM after maintenance; в – SD after HT



6

Рис. 2 (продолжение)

Fig. 2 (continuation)

так и в объеме зоны контакта. Наличие следов скольжения косвенно подтверждает, что холодная пластическая деформация трением скольжения в условиях тугой посадки сплава ОТ4-1 обусловлена движением дислокаций. Очаги выхода дислокаций, как отмечалось

в работах [28 – 30], вытравились в виде темных треугольников (рис. 3,  $\epsilon - \delta$ ); это косвенно подтверждается микродюротрией (рис. 4).

Наблюдается наличие несплошностей в микроструктуре ТДС: как указывалось ранее [24], полный

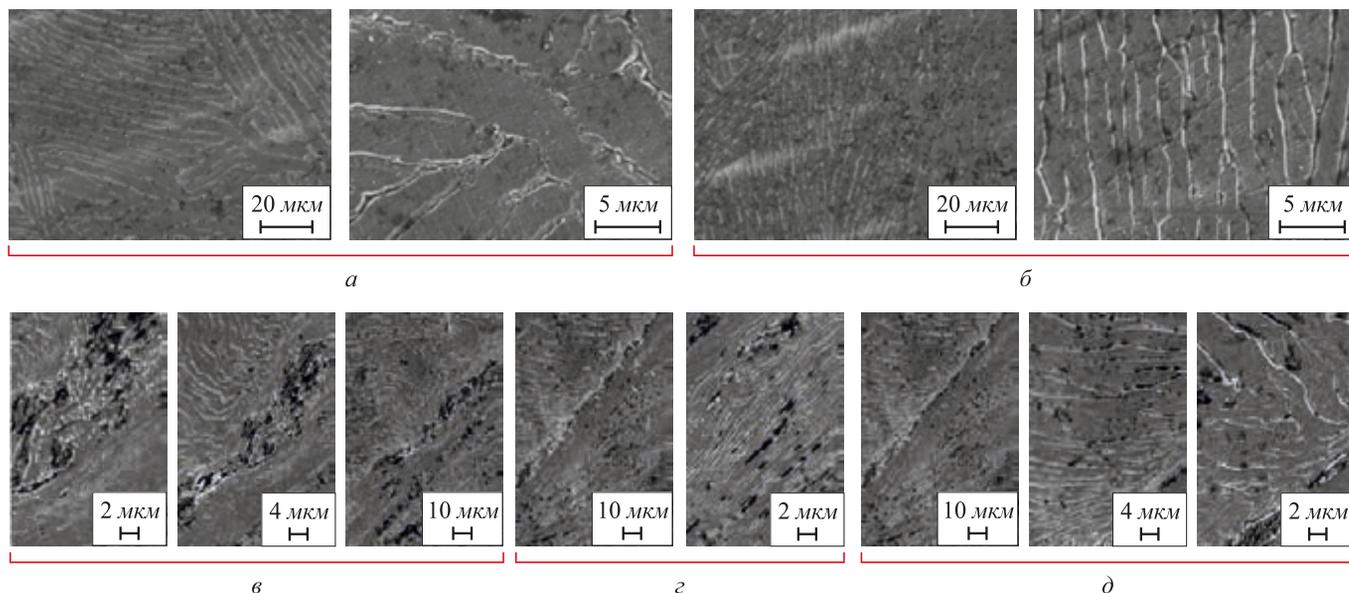


Рис. 3. Микроструктура (растровая электронная микроскопия) основного металла ( $a, б$ ) и зоны НС ( $e - д$ ) сплава ОТ4-1 после холодной деформации при тугой посадке с натягом 450 мкм:

$a$  и  $б$  – основной металл охватываемой и охватывающей заготовок;  $e$  и  $д$  – приконтактная область охватываемой и охватывающей заготовок;  $z$  – центр зоны соединения

Fig. 3. Microstructure (scanning electron microscopy) of the base metal ( $a, б$ ) and SJ zone ( $e - д$ ) of the OT4-1 alloy after cold deformation during cold forced fit with of 450  $\mu\text{m}$ :

$a$  and  $б$  – basic metal of covered and covering blanks;  $e$  and  $д$  – contact area of covered and covering blanks;  $z$  – the center of engagement zone

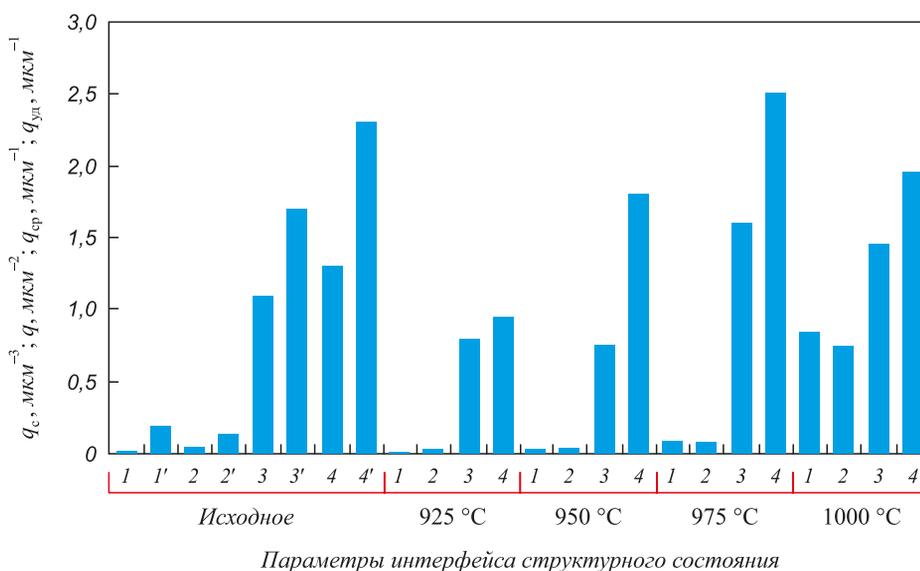


Рис. 4. Гистограмма изменения интерфейса структурного состояния сплава ОТ4-1 в зависимости от степени пластической деформации (минимальная ОМ в исходном состоянии  $1_i - 4_i$ , максимальная – ТДС  $1' - 4'$ ) и выдержке при термической обработке в автовакууме  $1 - 4$  в течение 60 мин:

$1 - q_c; 2 - q; 3 - q_{cp}; 4 - q_{ud}$

Fig. 4. Histogram of change in interface of structural state of OT4-1 alloy depending on degree of plastic deformation (minimum BM in the initial state  $1_i - 4_i$ , maximum – SDB  $1' - 4'$ ) and 60 minutes exposure during heat treatment in auto-vacuum:

$1 - q_c; 2 - q; 3 - q_{cp}; 4 - q_{ud}$

физический контакт или образование диффузионного соединения при холодной деформации составляет всего 50 – 70 % площади сопрягаемых поверхностей, поэтому потребовалось дополнительное «залечивание» несплошностей термической обработкой. Активирование процессов спекания наблюдали в работе [31] при деформации покрытия при термическом спекании. В работах [32, 33] наблюдали выравнивание внутренних зернограницных пустот после пятикратной экструзии титана.

Термическая обработка основного металла в температурном интервале фазового превращения в первоначальный момент приводит к появлению в микроструктуре глобулярной составляющей, переходящей вновь в игольчатое строение с повышением температуры и времени выдержки (рис. 2, б). Такая же закономерность структурных изменений наблюдается в ПО ТДС (рис. 2, в), при этом процесс превращения глобулярной структуры в игольчатую протекает в других температурно-временных условиях.

Появление глобулярной структуры наблюдается не только при нагреве в температурно-временных условиях фазового превращения, а и при температурах, превышающих температуру полиморфных превращений  $T_{\text{пн}}$ . Время существования глобулярной структуры зависит как от степени пластической деформации, так и от температуры нагрева. Степень деформации основного металла незначительна, особенно после отжига, поэтому в процессе термообработки при температуре 950 °C и выдержке в течение 10 мин глобулярная структура исчезает полностью (рис. 2, б). В случае повышенной степени пластической деформации, получаемой холодной тугой посадкой с натягом 450 мкм, глобулярная структура исчезает при температуре 950 °C с выдержкой в течение 1 ч, при 975 °C с выдержкой 40 мин, при 1000 °C с выдержкой 20 мин (рис. 2, в). При этих температурах практически полностью завершается процесс «залечивания» несплошностей, то есть исчезает линия соединения, образуется по микроструктуре сплошной металл ПО, не отличающийся от основного металла.

Наблюдается стадийность процесса структурных изменений в ПО при образовании неразъемного соединения. В первоначальный момент нагрева в ПО процесс рекристаллизации из-за стремления системы к минимуму энергии приводит к образованию глобулярных зерен из вытянутых пластическим деформированием зерен (рис. 2, б, в), уменьшению общей площади контактной поверхности. С увеличением времени выдержки и температуры идет процесс собирательной рекристаллизации и превращение глобулярных зерен в зерна игольчатой формы, одновременно с этим идет процесс слияния дискретных очагов (несплошностей) и на линии сопряжения процесс рекристаллизации сопровождается зарождением зерен и их ростом. Заканчивается процесс рекристаллизации образованием общих зерен в зоне контакта и исчезновением границ раздела (рис. 2, в –

$T = 950$  °C в течение 1 ч;  $T = 975$  °C в течение 40 мин;  $T = 1000$  °C в течение 20 мин).

Количественная оценка структурных изменений по основным параметрам интерфейса структурного состояния (ОПИСС) приведена на рис. 5, 6. Возможно описание кинетики и температурной зависимости структурных изменений от степени и режимов термической обработки в интервале фазового превращения сплава ОТ4-1.

Основные показатели интерфейса структурного состояния ( $q_c - 1$  и  $1'$ ;  $q - 2$  и  $2'$ ;  $q_{\text{сп}} - 3$  и  $3'$ ;  $q_{\text{уд}} - 4$  и  $4'$ ) (рис. 5) ПО ТДС после холодной тугой посадки (натяг 450 мкм) практически в разы (в 10, 4, 1,8 и 1,5 раза соответственно) превышают таковые основного металла в исходном состоянии. Отсюда очевидна необходимость упорядочения структуры ПО ТДС сплава ОТ4-1.

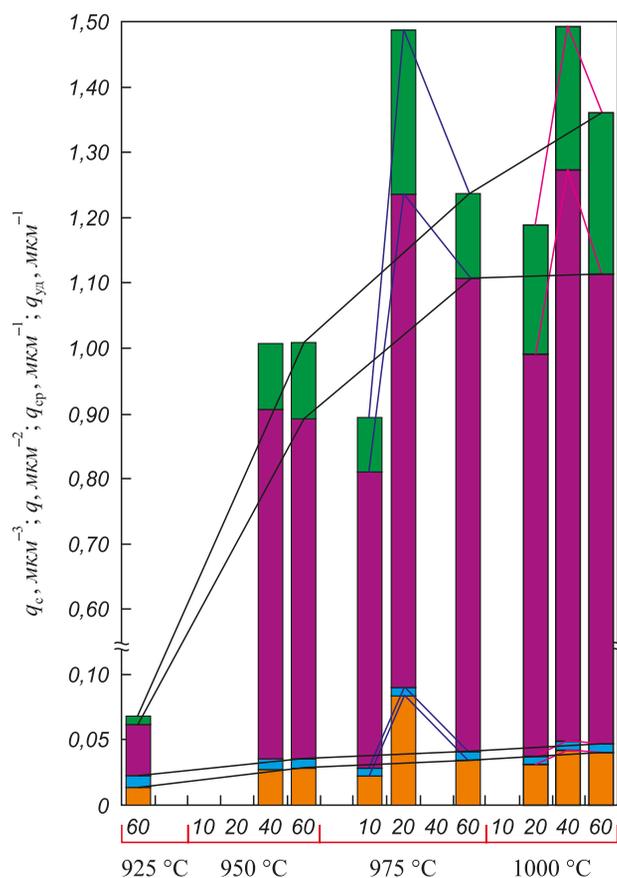


Рис. 5. Гистограмма изменения ОПИСС сплава ОТ4-1 (предварительно пластически деформированного холодной тугой посадкой, натяг 450 мкм ТДС ПО) в зависимости от температуры и времени выдержки при термической обработке в автовакууме:

■ – плотность зерен ( $q$ ),  $\text{мкм}^{-2}$ ; ■ – удельный периметр границ зерен ( $q_{\text{уд}}$ ),  $\text{мкм}^{-1}$ ; ■ – удельный параметр организации структуры ( $q_{\text{с}}$ ),  $\text{мкм}^{-3}$ ; ■ – средняя плотность границ зерен ( $q_{\text{сп}}$ ),  $\text{мкм}^{-1}$

Fig. 5. Histogram of change in BPSSI of OT4-1 alloy (pre-plastically deformed by cold forced fit of 450  $\mu\text{m}$  SDB CA) depending on temperature and exposure time during heat treatment in an auto-vacuum:

■ – density of grains ( $q$ ),  $\text{mkm}^{-2}$ ; ■ – specific perimeter of grain boundaries ( $q_{\text{sp}}$ ),  $\mu\text{m}^{-1}$ ; ■ – specific parameter of structure organization ( $q_{\text{sp}}$ ),  $\mu\text{m}^{-3}$ ; ■ – average density of grain boundaries ( $q_{\text{av}}$ ),  $\mu\text{m}^{-1}$

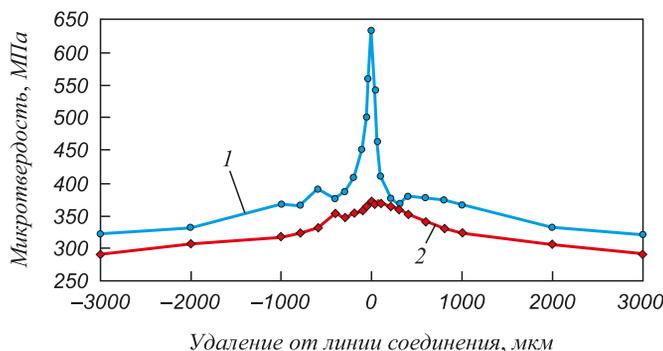


Рис. 6. Микротвердость образцов сплава ОТ4-1 ПО НС, полученных в условиях тупой посадки (натяг 450 мкм) (1) и термической обработки в автовакууме при 970 °С в течение 1 ч (2)

Fig. 6. Microhardness of the samples of OT4-1 alloy of SJ CA, obtained under conditions of forced fit (of 450 μm) (1) and heat treatment in autovacuum at 970 °C for 1 hour (2)

С повышением температуры термической обработки ОПИСС как основного металла, так и ПО ТДС сплава ОТ4-1 повышается, причем более интенсивно и на большую величину для основного металла (рис. 5, 6).

Кинетика процесса изменения ОПИСС характеризуется существенной интенсификацией в температурном интервале фазового α → β-превращения и замедлением при повышении температуры. Первоначально при достижении  $T_{\text{ин}}$  наблюдается стадия превращения вытянутых зерен в глобулярные (больше похожие на шестигранник – пчелиные соты) (рис. 2, б, в). При этом ОПИСС как для основного металла, так и для ПО ТДС близки к показателям ОМ в исходном состоянии, причем для ПО ТДС значительно ниже (рис. 5, 6). Следующая стадия при увеличении выдержки и повышении температуры сопровождается замедлением изменений ОПИСС, связанных с ростом пластинчатых игольчатых зерен как для основного металла, так и для ПО ТДС (рис. 5, 6).

Для ПО ТДС при повышении температуры выше  $T_{\text{ин}}$  (независимо от ее величины) обязательно наблюдается стадия глобуляризации структуры и интенсификация изменения ОПИСС (рис. 2, в, 6).

Изменение твердости ПО ТДС после холодной тупой посадки (натяг 450 мкм) имеет существенное различие. Максимальные значения HV в области контакта поверхностей составляют 4500 – 6500 МПа, ширина зоны –50 – +50 мкм; следующая зона средних значений HV – от 4000 до 3500 МПа, ширина зоны –1000 – +1000 мкм; зона основного металла повышенной твердости HV – от 3250 до 3500 МПа по сравнению с исходным состоянием HV от 2900 до 3000 МПа.

При термической обработке в автовакууме при 970 °С в течение 1 ч значения твердости ПО ТДС близки к значениям твердости исходного ОМ, незначительное превышение (примерно 20 %) наблюдается в зоне интенсивной холодной пластической деформации из-за измельчения зерна (табл. 2, рис. 4).

Прочность на срез ( $\sigma_{\text{ср}}$ ) при выпрессовке составляет для холодной тупой посадки 490 МПа, после термической обработки ( $\sigma_{\text{ср}}$ ) 950 МПа, то есть практически аналогична прочности при срезе цельной заготовки – 960 МПа.

## Выводы

Холодная пластическая деформация сплава ОТ4-1 приводит к образованию в ПО ТДС деформационного рельефа (следы скольжения по границам зерен – уменьшение площади контактных поверхностей и объемное взаимодействие как в плоскости контакта (искривление зерен), так и в объеме зоны контакта (очаги выхода дислокаций)). Основные показатели интерфейса структурного состояния (удельный параметр организации структуры, плотность зерен, средняя плотность границ зерен, развитость границ зерен в 10, 4, 1,8 и 1,5 раза соответственно превышают таковые для основного металла в исходном состоянии. Термическая обработка как основного металла, так и ПО ТДС приводит к стадийности структурных изменений и появлению в первоначальный момент в микроструктуре глобулярной составляющей, переходящей вновь в игольчатое строение с повышением температуры и времени выдержки. Впервые установлено явление появления стадии образования глобулярной структуры при нагреве пластически деформированного металла не только в температурно-временных условиях фазового превращения, а и при повышенных температурах, причем чем выше температура нагрева, тем меньше время ее существования. Кроме того, чем меньше степень пластической деформации, тем стадия глобуляризации структуры наблюдается при температурах, более близких к  $T_{\text{ин}}$ , и меньших выдержках. Количественная оценка структурных изменений по основным параметрам интерфейса структурного состояния позволяет выявить механизм, кинетику и температурную зависимость структурных изменений от степени пластической деформации и режимов термической обработки и определить температурно-временные условия термической обработки, обеспечивающие «залечивание» несплошностей, исчезновение границ раздела и свойства ТДС, идентичные свойствам основного металла.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Люшенский А.В. Диффузионная сварка разнородных материалов: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издат. центр «Академик», 2006. – 208 с.
2. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / В.Н. Замков, В.Е. Блащук и др. – Киев: Наукова Думка, 1986. – 240 с.
3. Сименз Р.Ф., Стейнберг М.А. Требования к сплавам и конструирование планера самолета. – В кн.: Проблемы разработки конструктивных сплавов / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1980. С. 136 – 155.

**Изменение микротвердости ПО НС сплава в зависимости от холодной посадки натяг 450 мкм и термической обработки в автовакууме при 970 °С в течение 1 ч**

*Table 2. Change in microhardness of alloy SJ CA depending on cold forced fit of 450 µm and heat treatment in autovacuum at 970 °C for 1 h*

Удаление от линии соединения, мкм	HV, МПа				
	Зона 1	Зона 2	Зона 3	Зона 4	среднее
-3000	307/299	331/286	323/301	323/279	321,00/291,25
-2000	326/301	329/319	323/302	348/309	331,50/307,75
-1000	339/326	357/321	387/308	389/315	368,00/317,50
-800	376/331	320/318	358/323	403/321	364,25/323,25
-600	387/346	386/337	358/330	433/319	391,00/333,00
-400	366/339	359/340	358/348	420/389	375,75/354,00
-300	345/348	405/340	358/351	441/348	387,25/346,75
-200	387/360	408/349	389/342	445/369	407,25/355,00
-100	489/359	436/348	457/352	420/376	450,50/358,75
-60	551/369	445/358	548/366	445/367	497,25/365,00
-40	588/380	548/376	555/369	545/359	559,00/371,00
-20	587/386	556/371	569/376	598/361	577,50/373,50
0	605/389	598/367	638/376	688/358	632,25/372,50
20	573/390	569/359	601/375	621/355	591,00/369,75
40	529/381	532/360	587/370	508/355	539,00/366,50
60	476/362	432/371	466/369	476/385	462,50/371,75
100	398/359	386/367	438/370	420/381	410,50/369,25
200	357/362	386/351	358/372	401/375	375,50/365,00
300	348/361	388/348	348/369	386/366	367,50/361,00
400	397/351	376/355	339/361	408/342	380,00/352,25
600	357/337	387/351	366/347	397/330	376,75/341,25
800	397/323	331/339	357/341	408/322	373,25/331,25
1000	357/311	336/325	376/341	387/319	364,00/324,00
2000	339/308	338/311	317/306	338/305	333,00/307,50
3000	317/298	307/276	326/291	329/304	319,75/292,25

Пр и м е ч а н и е. Через косую приведены значения HV(x) и HV(г) для образцов натяг 450 мкм и натяг 450 мкм после термической обработки.

- Сварка высокопрочных титановых сплавов / С.М. Гуревич, Ф.Р. Куликов, В.Н. Замков и др. – М.: Машиностроение, 1975. – 150 с.
- Петрунин И.Е. Справочник по пайке. – М.: Машиностроение, 2003. – 480 с.
- Каракозов Э.С. Сварка металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1986. – 280 с.
- Диффузионная сварка титана и его сплавов / А.В. Бондарь, В.В. Пешков, Л.С. Киреев, В.В. Шурупов. – Воронеж: изд. ВГУ, 1998. – 256 с.
- Петренко В.Р. Металловедение диффузионной сварки титана. – М.: Издательский центр «Технология машиностроения», 2005. – 315 с.
- Yilbas B.S., Sahin A.Z. Friction welding: Thermal and Metallurgical Characteristics. – New York: Springer, 2014. – 71 p.
- Friction Stir Welding and Processing VI / R.S. Mirsha, M.W. Mahoney, Y. Sato, Y. Hovanski, R. Verman. – New Jersey: John Wiley&Sons, Inc., 2011. – 416 p.
- Бойко Н.В., Хазов И.А., Селезнева Л.В., Бушмин Б.В., Семенов А.Н., Дубинин Г.В., Новожилов С.Н., Плышевский М.И. Структура сварного соединения титановый сплав – аустенитная сталь, полученного сваркой давлением с промежуточными покрытиями // Материаловедение и термическая обработка металлов. 2012. № 9. С. 14 – 18.
- Kundu S., Chatterjee S., Bhola S.M., Mishra B. Structure and properties of solid state diffusion bonding of 17-4PH stainless steel and titanium // Materials Science and Technology. 2014. No. 30. P. 248 – 256.
- Булков А.Б., Пешков В.В., Балбеков Д.Н., Небольсин С.М., Мальцев Г.В. Диффузионная сварка титановых заготовок через прослойку с высоким сопротивлением деформации // Сварочное производство. 2013. № 11. С. 12 – 16.
- Зеер Г.М., Зеленкова Е.Г., Королева Ю.П., Михеев А.А., Прокопьев С.В. Диффузионная сварка через промежуточные слои // Сварочное производство. 2012. № 7. С. 38 – 43.

15. Deng Y., Sheng G., Huang Z., Fan L. Microstructure and mechanical properties of diffusion bonded titanium / 304 stainless steel joint with pure Ag interlayer // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2013. No. 18. P. 143 – 146.
16. Sheng G., Xu C., Deng Y. Evolution of the microstructure and mechanical properties of diffusion bonded joints of titanium to stainless steel with a pure silver interlayer // *Materials&Design*. 2013. No. 46. P. 84 – 87.
17. Булков А.Б., Пешков В.В., Петренко В.Р., Балбеков Д.Н. Анализ процесса деформации металла в зоне соединений при диффузионной сварке титановых оболочковых конструкций // *Сварочное производство*. 2011. № 11. С. 56 – 61.
18. Пешков В.В., Булков А.Б., Сафонов С.В., Петренко В.Р., Балбеков Д.Н., Киреев Л.С. Механизм образования соединения при диффузионной сварке титана // *Сварочное производство*. 2012. № 12. С. 23 – 28.
19. Булков А.Б., Балбеков Д.Н., Пешков В.В., Стрыгин А.И. Кинетика развития физического контакта при диффузионной сварке титана // *Сварочное производство*. 2013. № 10. С. 41 – 49.
20. Wood N. SPE/DB spells fabricating breakthrough for titanium. *Machine and Tool // Blue Book*. 1978. Vol. 73. No. 10. P. 98 – 107.
21. Муравьев В.И., Бахматов П.В., Саблин П.А. Активация процессов формирования соединений из металлов и сплавов. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 366 с.
22. Муравьев В.И., Мельничук А.Ф., Бахматов П.В. Исследование влияния диффузионных процессов взаимодействия порошковых частиц сплава 2М2А и листовых заготовок из сплава ВТ20 на свойства композиционных конструкций // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2011. № 1. С. 42 – 45.
23. Пат. 2488475 РФ. Способ соединения заготовок вал – втулка / В.И. Муравьев, П.В. Бахматов, К.А. Мелкоступов, А.А. Евстигнеев. Заявл. 07.10.2011; опубл. 27.07.2013. Бюл. № 21.
24. Муравьев В.И., Пицък В.С. Бахматов П.В. Влияние режимов холодной пластической деформации и последующей термообработки на структуру и свойства твердофазного диффузионного соединения титановых сплавов // *Сварка и диагностика*. 2017. № 1. С. 17 – 22.
25. Tushinsky L., Kovensky I., Plokhov F., Sindeev V., Rechedko P. *Coated Metal. Structure and Properties of Metal Coating Compositions* – Berlin, Heidelberg, N.Y. Springer – Verlag, 2002. – 458 p.
26. Федер Е. Фракталы / Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
27. Основы количественной и компьютерной металлографии / В.А. Ким, О.В. Башков, А.А. Попкова и др. – Комсомольск-на-Амуре: изд. КнАГТУ, 2013. – 148 с.
28. Электронная микроскопия тонких кристаллов / П. Хирш, А. Хови, Р. Николсон и др. – М.: Мир, 1968. – 574 с.
29. Sturm F. Die röntgenographische Ermittlung der kohärentlänge, Gitterverzerrung und Strapelfehlerdicke in Rupfer – Felspanem // *Zeitschrift für Metallkunde*. 1969. Vol. 60. No. 6. P. 541 – 545.
30. Van Dijk I.A. The direct observation in the transmission electron microscope of the heavily deformed surface layer of a cooper pin after dry sliding against a sterling // *Wear*. 1976. No. 42. P. 106 – 117.
31. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
32. Карпінос Б.С., Павленко Д.В., Качан О.Я. Деформування титанового сплаву ВТ1-0 зі субмікроструктурною структурою при статичному навантаженні // *Проблеми прочності*. 2012. № 1. С. 137 – 146.
33. Ruge I., Wallheinke H.D. *Zeitschrift für Metallkunde*. 1977. Vol. 68. No. 2. P. 90 – 96.

Поступила 25 декабря 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 12, PP. 963–973.

## PECULIARITIES OF CHANGE IN STRUCTURE AND PROPERTIES OF SOLID-PHASE COMPOUND OF OT4-1 ALLOY OBTAINED BY COLD FORCED FIT AND FURTHER THERMAL TREATMENT

*P.V. Bakhmatov, V.I. Murav'ev, A.V. Frolov, V.S. Pitsyk*

**Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk Territory, Russia**

**Abstract.** Regularities of the effect of maximum value of stress-strain state, obtained under conditions of cold forced fit of blanks of the shaft-hole system during formation of solid-phase diffusion bond (SDB) and subsequent modes of temperature action in autonomous vacuum, are investigated on evolution of structural changes and properties of contact area (CA) of solid joints of OT4-1 alloy. It is shown that under cold plastic deformation of OT4-1 alloy, formation of SDB in microstructure of CA leads to generation of deformation relief (traces of sliding along the grain boundaries), decrease in contact surfaces, and to volume interaction, both in the plane of contact (curvature of grains) and in volume of contact zone (outbreaks of dislocations). The main parameters (specific parameter of structure organization, grains density, average density of grain boundaries, development of grain boundaries) exceed those of the initial state of base metal in 10, 4, 1.8, 1.5 times respectively. Temperature influences under conditions of autonomous vacuum in the interval of phase transformations  $\alpha \rightarrow \beta$  lead to staging of structural changes, both in the main metal and in SDB contact area. At the initial moment, globular component appears in microstructure, which again goes back to acicular structure of the initial state (with some increase in microhardness) with increase in holding time, and also with increase in temperature. For the first time, phenomenon of appearance of the globular structure formation stage during heating of plastically deformed metal is established not only under temperature and time conditions of phase transformation, but also under elevated

temperatures; and the higher heating temperature is, the shorter is lifetime of the stage. Moreover with less degree of plastic deformation, stage of structure globularization is observed at temperatures close to  $T_{pt}$  and shorter exposures. For base metal (degree of deformation is insignificant), globular structure disappears almost completely after heating for 10 min at 950 °C. For stress-strain state of cold-deformed SDB, globular structure disappears when heated: for 1 hour at 950 °C; for 40 min at 975 °C; for 20 min at 1000 °C. At these temperatures, process of discontinuities “healing” is almost completed, i.e. bond line disappears, and solid metal is formed along the microstructure of the CA, not differing from the basic metal with insignificant increase in microstructure. Quantitative assessment of structural changes in basic parameters of interface of structural state makes it possible to reveal mechanism, kinetics and structural dependence on degree of plastic deformation and heat treatment regimes, that ensure discontinuities “healing”, disappearance of interfaces and provision of SDB properties no worse than those of basic metal.

**Keywords:** structure, solid-phase connection, forced fit, heat treatment, titanium alloy, structural state interface.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-12-963-973

### REFERENCES

1. Lyushenskii A.V. *Diffuzionnaya svarka raznorodnykh materialov: ucheb. posobie dlya stud. vyssh. ucheb. zavedeniya* [Diffusion welding of dissimilar materials: Manual for universities]. Moscow: Akademiya, 2006, 208 p. (In Russ.).
2. Zamkov V.N., Blashchuk V.E. etc. *Metallurgiya i tekhnologiya svarki titana i ego splavov* [Metallurgy and welding technology for

- titanium and its alloys]. Kiev: Naukova Dumka, 1986, 240 p. (In Russ.).
3. Simenz R.F., Steinberg M.A. Alloy Needs and Design: The Airframe. In: *Fundamental aspects of structural alloy design*. Jaffee Robert ed. Battele inst. materials sci. colloquia, 1975, pp. 229-256. (Russ. ed.: Simenz R.F., Steinberg M.A. Trebovaniya k splavam i konstruirovaniye planera samoleta. In: *Problemy razrabotki konstruktivnykh splavov*. Moscow: Metallurgiya, 1980, pp. 136–155.).
  4. Gurevich S.M., Kulikov F.R., Zamkov V.N. etc. *Svarka vysokoprochnykh titanovykh splavov* [Welding of high strength titanium alloys]. Moscow: Mashinostroenie, 1975, 150 p. (In Russ.).
  5. Petrunin I.E. *Spravochnik po paika* [Soldering handbook]. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 480 p. (In Russ.).
  6. Karakozov E.S. *Svarka metallov davleniem* [Pressure welding]. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 280 p. (In Russ.).
  7. Bondar' A.V., Peshkov V.V., Kireev L.S., Shurupov V.V. *Diffuzionnaya svarka titana i ego splavov* [Diffusion welding of titanium and its alloys]. Voronezh: VGU, 1998, 256 p. (In Russ.).
  8. Petrenko V.R. *Metallovedenie diffuzionnoi svarki titana* [Metallurgy of diffusion welding of titanium]. Moscow: Tekhnologiya mashinostroeniya, 2005, 315 p. (In Russ.).
  9. Yilbas B.S., Sahin A.Z. *Friction welding: Thermal and Metallurgical Characteristics*. New York: Springer, 2014, 71 p.
  10. Mirsha R.S., Mahoney M.W., Sato Y., Hovanski Y., Verman R. *Friction Stir Welding and Processing VI*. New Jersey: John Wiley&Sons, Inc., 2011, 416 p.
  11. Boiko N.V., Khazov I.A., Selezneva L.V., Bushmin B.V., Semenov A.N., Dubinin G.V., Novozhilov S.N., Plyshevskii M.I. Structure of titanium alloy/austenitic steel welds formed by pressure welding with intermediate coatings. *Metal Science and Heat Treatment*. 2013, vol. 54, no. 9-10, pp. 483–487.
  12. Kundu S., Chatterjee S., Bhola S.M., Mishra B. Structure and properties of solid state diffusion bonding of 17-4PH stainless steel and titanium. *Materials Science and Technology*. 2014, no. 30, pp. 248–256.
  13. Bulkov A.B., Peshkov V.V., Balbekov D.N., Nebol'sin S.M., Mal'tsev G.V. Diffusion welding of titanium components through an interlayer with high deformation resistance. *Welding International*. 2014, vol. 28, no. 11, pp. 900–906.
  14. Zeer G.M., Zelenkova E.G., Koroleva Yu.P., Mikheev A.A., Prokop'ev S.V. Diffusion bonding through interlayers. *Welding International*. 2013, vol. 27, no. 8, pp. 683–643.
  15. Deng Y., Sheng G., Huang Z., Fan L. Microstructure and mechanical properties of diffusion bonded titanium / 304 stainless steel joint with pure Ag interlayer. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2013, no. 18, pp. 143–146.
  16. Sheng G., Xu C., Deng Y. Evolution of the microstructure and mechanical properties of diffusion bonded joints of titanium to stainless steel with a pure silver interlayer. *Materials & Design*. 2013, no. 46, pp. 84–87.
  17. Bulkov A.B., Peshkov V.V., Petrenko V.R., Balbekov D.N. Analysis of the process of metal deformation in zone of joints during diffusion welding of titanium shell-type structures. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2011, no. 11, pp. 56–61. (In Russ.).
  18. Peshkov V.V., Bulkov A.B., Safonov S.V., Petrenko V.R., Balbekov D.N., Kireev L.S. Mechanism of formation of the joint in diffusion welding of titanium. *Welding International*. 2013, vol. 27, no. 12, pp. 980–985.
  19. Bulkov A.B., Balbekov D.N., Peshkov V.V., Strygin A.I. Kinetics of development of physical contact in diffusion welding of titanium. *Welding International*. 2014, vol. 28, no. 10, pp. 810–815.
  20. Wood N. SPE/DB spells fabricating breakthrough for titanium. *Machine and Tool Blue Book*. 1978, vol. 73, no. 10, pp. 98–107.
  21. Murav'ev V.I., Bakhmatov P.V., Sablin P.A. *Aktivatsiya protsessov formirovaniya soedinenii iz metallov i splavov* [Activation of metals and alloys joint formation processes]. Vladivostok: Dal'nauka, 2012, 366 p. (In Russ.).
  22. Murav'ev V.I., Mel'nichuk A.F., Bakhmatov P.V. Influence of diffusion processes of interaction of powder particles of 2M2A alloy and sheet blanks of VT20 alloy on properties of composite structures. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2011, no. 1, pp. 42–45. (In Russ.).
  23. Murav'ev V.I., Bakhmatov P.V., Melkostupov K.A., Evstigneev A.A. *Sposob soedineniya zagotovok val – vtulka* [Method of shaft – sleeve blanks engagement]. Patent RF no. 2488475. *Byulleten' izobretenii*. 2013, no. 21. (In Russ.).
  24. Murav'ev V.I., Pitsyk V.S. Bakhmatov P.V. Influence of cold plastic deformation regimes and subsequent heat treatment on structure and properties of solid-phase diffusion engagement of titanium alloys. *Svarka i Diagnostika*. 2017, no. 1, pp. 17–22. (In Russ.).
  25. Tushinsky L., Kovensky I., Plokhov F., Sindeev V., Rechedko P. *Coated Metal. Structure and Properties of Metal Coating Compositions*. Berlin, Heidelberg, N.Y. Springer-Verlag. 2002, 458 p.
  26. Feder Jens. *Fractals*. Springer; 1988, 284 p. (Russ.ed.: Feder J. *Fraktaly*. Moscow: Mir, 1991, 254 p.).
  27. Kim V.A., Bashkov O.V., Popkova A.A., etc. *Osnovy kolichestvennoi i komp'yuternoi metallografii* [Basics of quantitative and computerized metallography]. Komsomolsk-on-Amur: KnAGTU, 2013, 148 p. (In Russ.).
  28. Hirsch P.B., Howie A., Nicholson R., Pashley D.W., Whelan M.J. *The Electron Microscopy of Thin Crystals*. Butterworths, 1965, 549 p. (Russ.ed.: Hirsh P., Hovi R., Nicholson R. *Elektronnaya mikroskopiya tonkikh kristallov*. Moscow: Mir, 1968, 574 p.).
  29. Sturm F. Die röntenographische Ermittlung der kohärentlänge, Gitterverzerrung und Strapelfehlerdicke in Rupfer – Felspanem. *Zeitschrift für Metallkunde*. 1969, vol. 60, no. 6, pp. 541–545. (In Germ.).
  30. Van Dijck I.A. The direct observation in the transmission electron microscope of the heavily deformed surface layer of a cooper pin after dry sliding against a sterling. *Wear*. 1976, no. 42, pp. 106–117.
  31. Khasui A., Morigaki O. *Naplavka i napylenie* [Surfacing and spraying]. Trans. from Japan. Moscow: Mashinostroenie, 1985, 240 p. (In Russ.).
  32. Karpinos B.S., Pavlenko D.V., Kachan O.Ya. Deformation of VT1-0 titanium alloy with submicrocrystalline structure under static loading. *Problemy prochnosti*. 2012, no. 1, pp. 137–146. (In Ukr.).
  33. Ruge I., Wallheinke H.D. *Zeitschrift für Metallkunde*. 1977, vol. 68, no. 2, pp. 90–96. (In Germ.).

#### Information about the authors:

**P.V. Bakhmatov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair “Mechanical Engineering and Metallurgy” (mim@knastu.ru)  
**V.I. Murav'ev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Mechanical Engineering and Metallurgy” (vmuravyev@mail.ru)  
**A.V. Frolov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Industrial Electronics (afrolov\_kms@mail.ru)  
**V.S. Pitsyk**, Postgraduate of the Chair “Mechanical Engineering and Metallurgy” (BiktorSergeevich@yandex.ru)

Received December 25, 2017

## ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ НА СКОРОСТЬ МИГРАЦИИ ГРАНИЦ НАКЛОНА В НИКЕЛЕ

*Полетаев Г.М.<sup>1</sup>, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой высшей математики  
и математического моделирования (gmpoletaev@mail.ru)*

*Зоря И.В.<sup>2</sup>, к.т.н., директор архитектурно-строительного института*

*Ракитин Р.Ю.<sup>3</sup>, к.ф.-м.н., директор колледжа*

*Коханенко Д.В.<sup>4</sup>, к.ф.-м.н., доцент кафедры учета и информационных технологий в бизнесе*

*Старостенков М.Д.<sup>1</sup>, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики (genphys@mail.ru)*

<sup>1</sup> Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова  
(656038, Россия, Барнаул, Алтайский край, пр. Ленина, 46)

<sup>2</sup> Сибирский государственный индустриальный университет  
(654007, Россия, Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, 42)

<sup>3</sup> Алтайский государственный университет  
(656049, Россия, Барнаул, Алтайский край, пр. Ленина, 61)

<sup>4</sup> Финансовый университет при Правительстве РФ, Барнаулский филиал  
(656038, Россия, Барнаул, Алтайский край, пр. Ленина, 54)

**Аннотация.** Методами молекулярной динамики проведено исследование влияния деформации вдоль различных направлений относительно мигрирующей границы на скорость миграции границ наклона с осями разориентации  $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$  в никеле. Границы зерен создавали в модели  $U$ -образной формы. Сила поверхностного натяжения границы, возникающая вследствие стремления границы минимизировать свою энергию, являлась причиной направленного перемещения границы в сторону уменьшения ее площади. Сила, провоцирующая миграцию, и скорость миграции границы оставались в модели постоянными в течение почти всего движения границы, плавно уменьшаясь к концу компьютерного эксперимента, что позволяло достаточно просто проводить измерение скорости миграции. В работе рассматривали влияние одноосной деформации вдоль осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  на скорость миграции границ. Одноосную деформацию в модели задавали в начале компьютерного эксперимента путем изменения соответствующих межатомных расстояний вдоль одной из осей. Взаимодействия атомов никеля друг с другом описывали с помощью многочастичного потенциала Клери-Розато, построенного в рамках модели сильной связи. Для рассматриваемых границ получены зависимости скорости миграции при температуре 1700 К от угла разориентации. Показано, что большеугольные границы наклона  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$  мигрируют приблизительно с одной и той же скоростью, тогда как подвижность малоугольных границ значительно отличается: малоугольные границы  $\langle 111 \rangle$  мигрируют примерно в два раза быстрее границ  $\langle 100 \rangle$ . Получены данные, что почти во всех случаях (как при упругой деформации сжатия, так и при растяжении) скорость миграции рассматриваемых границ замедлялась. Исключением являлся случай деформации вдоль оси наклона границы  $\langle 111 \rangle$ . При сжатии вдоль оси наклона граница  $\langle 111 \rangle$  мигрировала быстрее, при растяжении, наоборот, медленнее. Полученные результаты свидетельствуют в пользу того, что миграция границ наклона осуществляется не за счет диффузионных процессов (например, переползания дислокаций, одиночных миграций атомов), а, по всей видимости, путем коллективных атомных перестановок: сдвигов, скольжений и расщеплений зернограницных дислокаций.

**Ключевые слова:** молекулярная динамика, граница зерен, миграция границы, деформация, граница наклона.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-974-979

### ВВЕДЕНИЕ

Миграция границ зерен – перемещение границы по нормали к ее поверхности. Миграция границ имеет определяющее значение в развитии рекристаллизации, во многих фазовых превращениях. К настоящему времени известны многие основные закономерности миграции границ зерен в зависимости от разных факторов [1, 2]. Подвижность определяется типом и структурой границы, температурой, наличием различных дефектов. С ростом температуры подвижность границ увеличивается, причем исследователи отмечают, что на температурной зависимости подвижности имеется, как правило, два или даже три интервала с различны-

ми энергиями активации миграции [1 – 3]. В области высоких температур наблюдается более низкая энергия активации. Многие исследования, выполненные как на металлах с кубической, так и гексагональной кристаллической решеткой, показали, что с ростом угла разориентации зерен подвижность границ в целом увеличивается. В работах [4, 5] отмечается, что самыми подвижными границами в металлах с ГЦК решеткой по сравнению со всеми другими границами являются границы наклона  $\langle 111 \rangle$  с углом разориентации  $38^\circ$ . Вместе с тем относительно энергии активации миграции границ до сих пор есть разногласия. Например, в работах [1, 2] говорится, что энергия активации почти монотонно уменьшается при увеличении угла разориентации в диа-

пазоне малоугловых границ. Однако в работах [6–8] результаты экспериментов по миграции границ наклона показали, что малоугловые границы с одной и той же осью разориентации имеют почти одинаковую энергию активации миграции в широком диапазоне углов разориентации, что косвенно свидетельствует об одинаковом элементарном механизме миграции таких границ.

Немотя на давний интерес к проблеме миграции границ и рекристаллизации, в настоящее время остается много вопросов, связанных, в частности, с механизмом миграции на атомном уровне для разных типов границ, влиянием на кинетику миграции различных дефектов кристаллической структуры, деформации. В работах [9, 10] было установлено, что подвижность границ заметно уменьшается с повышением давления, причем для границ разного типа (произвольных и специальных) этот эффект отличается. В связи с этим возникает вопрос, как именно влияет деформация на подвижность границ разного типа. Настоящая работа посвящена исследованию методом молекулярной динамики влияния деформации вдоль различных направлений относительно мигрирующей границы на скорость миграции границ наклона с осями разориентации  $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$  в типичном металле с ГЦК кристаллической решеткой – никеле.

#### ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

За основу была взята методика исследования миграции границы зерен наклона, предложенная и развитая в работах [2, 6]. В настоящем случае создается четко

аттестованная граница  $U$ -образной формы (рис. 1, *a*) (ось разориентации совпадает с осью  $Z$ ). Сила поверхностного натяжения границы, возникающая вследствие стремления границы минимизировать свою энергию, является причиной направленного перемещения границы в сторону уменьшения ее площади [11–13]. Сила, провоцирующая миграцию, и скорость миграции границы остаются в рассматриваемой модели постоянными в течение почти всего движения границы, плавно уменьшаясь к концу компьютерного эксперимента, что позволяет достаточно просто проводить измерение скорости миграции. На рис. 1, *b* приведен пример изменения положения границы наклона  $\langle 111 \rangle$  с углом разориентации  $30^\circ$  после молекулярно-динамического эксперимента в течение 200 пс.

В работах [14–16] похожую модель использовали для моделирования методом молекулярной динамики миграции тройного стыка границ зерен. В работах [15, 16] моделирование проводили в двумерной модели. Следует заметить, что относительно механизма миграции границ зерен, особенно малоугловых, двумерная и трехмерная модели имеют принципиальное отличие. В двумерной модели зернограницные краевые дислокации не имеют периодически расположенных вдоль ядер дислокаций изломов, которые играют важную роль в зернограницных процессах, особенно диффузии [17]. Поэтому в настоящей работе было принято решение создать трехмерный расчетный блок в молекулярно-динамической модели в виде пластины толщиной в 12 атомных плоскостей (рис. 1, *a*). Этой толщины

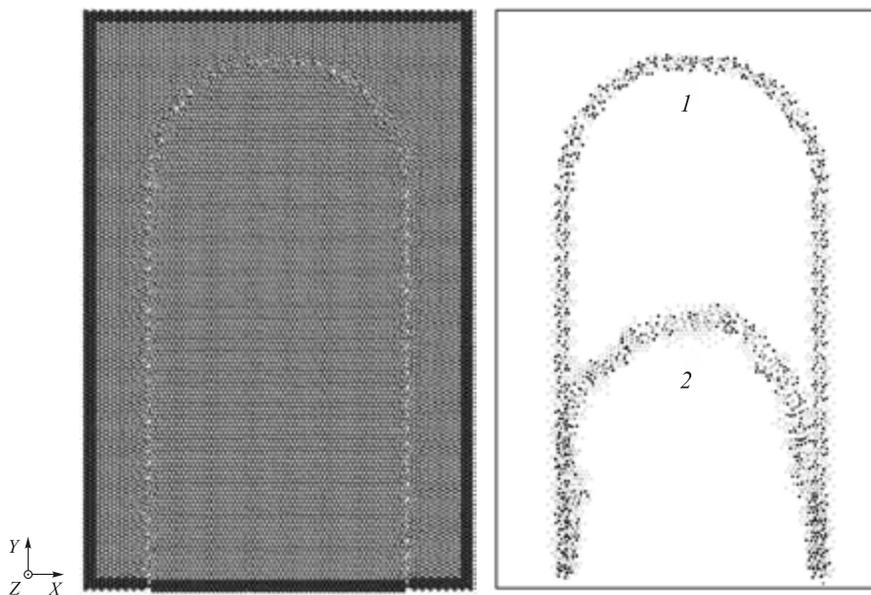


Рис. 1. Расчетный блок, содержащий границу наклона  $\langle 111 \rangle 30^\circ$ :

*a* – вид на плоскость  $XY$  в начальный момент времени (атомы, которые оставались неподвижными в течение компьютерного эксперимента окрашены в темно-серый цвет); *b* – начальное положение границы (1) и положение после моделирования в течение 200 пс при температуре 1700 К (2), показанные с помощью визуализатора свободного объема

Fig. 1. Design unit, containing edge boundary  $\langle 111 \rangle 30^\circ$ :

*a* – view of  $XY$  plane at the initial moment of time (atoms that remained stationary during computer experiment are colored in dark gray); *b* – initial position of the boundary (1) and position after simulation for 200 ps at temperature of 1700 K (2), shown using free volume visualizer

вполне достаточно для появления эффектов, связанных с изломами зернограничных дислокаций. В случае границ наклона  $\langle 111 \rangle$  расчетный блок никеля имел высоту 18,0 нм, ширину 12,0 нм и толщину 2,4 нм. Для границ  $\langle 100 \rangle$  размеры составляли 18,2, 12,1 и 2,2 нм соответственно. Блоки содержали примерно 50 000 атомов. Вдоль оси  $Z$  (рис. 1, *a*) имитировали бесконечное повторение структуры, то есть были наложены периодические граничные условия. На краю расчетного блока границы зерен должны быть зафиксированы, что подразумевает сохранение ориентации кристаллической решетки двух разных зерен на границе блока. В связи с этим по осям  $X$  и  $Y$  границы блока (выделены темно-серым цветом на рис. 1, *a*) были жестко закреплены для фиксации заданной разориентации зерен.

Для описания межатомных взаимодействий использовали многочастичные потенциалы Клери-Розато [18], построенные в приближении сильной связи. Потенциалы такого типа неоднократно использовали в молекулярно-динамических моделях и прошли апробацию по большому числу характеристик [19 – 22]. Опыт их применения показывает, что с их помощью удается описать разнообразные свойства металлов и сплавов. Шаг интегрирования по времени в методе молекулярной динамики составлял 2 фс. Температуру в модели задавали через начальные скорости атомов согласно распределению Максвелла, при этом учитывали тепловое расширение расчетных блоков. Для сохранения температуры постоянной в процессе моделирования использовали термостат Нозе-Гувера.

В настоящей работе рассматривали влияние одноосной деформации вдоль осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  на скорость миграции границ. Одноосную деформацию в модели задавали в начале компьютерного эксперимента путем изменения соответствующих межатомных расстояний вдоль одной из осей.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены зависимости скорости миграции ( $v$ ) границ наклона  $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$  от угла разориентации ( $\theta$ ). Измерение скорости миграции границ зерен проводили при температуре 1700 К. При этой температуре, близкой к температуре плавления никеля, миграция границ с углом разориентации выше  $10^\circ$  происходила с достаточно высокой скоростью, чтобы ее можно было измерять в молекулярно-динамической модели. Специальные и симметричные границы в настоящей работе не рассматривали.

Поверхностное натяжение границ зерен пропорционально их энергии. С ростом угла разориентации растет энергия и натяжение [2, 13], в связи с чем увеличивается и сила, провоцирующая миграцию границы. Для большеугловых границ энергия примерно одинакова, что характерно, по мнению многих авторов, для большого класса большеугловых границ и границ

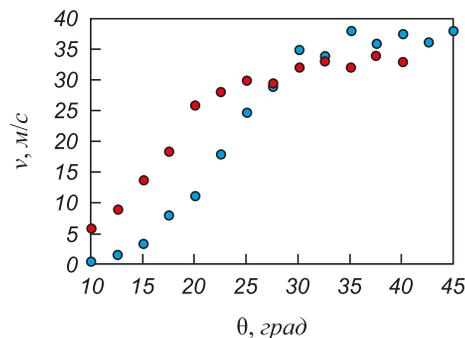


Рис. 2. Скорость миграции границ наклона и  $\langle 100 \rangle$  (●) и  $\langle 111 \rangle$  (●) при температуре 1700 К в зависимости от угла разориентации  $\theta$  в никеле

Fig. 2. Migration rate of edge boundaries  $\langle 100 \rangle$  (●) and  $\langle 111 \rangle$  (●) at temperature of 1700 K, depending on misorientation angle  $\theta$  in nickel

смешанного типа, в связи с чем, например, большинство углов между границами в тройных стыках близки к  $120^\circ$  [23, 24].

Угол разориентации зерен варьировался от  $10$  до  $45^\circ$  для границ  $\langle 100 \rangle$  и до  $40^\circ$  для границ  $\langle 111 \rangle$ . В случае границ  $\langle 100 \rangle$  максимальный угол разориентации составлял  $45^\circ$ . В случае границ  $\langle 111 \rangle$  принимали во внимание тот факт, что наибольшей подвижностью, согласно, например работ [4, 5], обладают границы наклона  $\langle 111 \rangle$  с углом разориентации  $38^\circ$ . С ростом угла разориентации скорость миграции границ возрастала, что является известной закономерностью [1, 2]. Следует обратить внимание, что при углах разориентации выше  $25^\circ$  большеугловые границы  $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$  мигрируют приблизительно с одной скоростью ( $30 - 37$  м/с при температуре 1700 К), тогда как скорости миграции малоугловых границ наклона  $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$  существенно отличаются: малоугловые границы  $\langle 100 \rangle$  мигрируют примерно в два раза медленнее границ  $\langle 111 \rangle$ , что объясняется, по всей видимости, различием дислокационной структуры рассматриваемых границ.

На рис. 3 приведены полученные в модели зависимости скорости миграции границ наклона  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$  с углом разориентации  $30^\circ$  от степени деформации отдельно вдоль осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . Деформацию рассматривали упругую: от 3 % одноосного сжатия (отрицательные значения  $\epsilon$  на рис. 3) до 3 % растяжения (положительные значения). В молекулярно-динамической модели при таких значениях деформации пластические сдвиги не инициировались.

В первую очередь следует обратить внимание на то, что почти во всех случаях (как при упругой деформации сжатия, так и при растяжении) скорость миграции рассматриваемых границ замедлялась. Данный результат не является тривиальным и, по всей видимости, не связан с изменением свободного объема при упругой деформации [25], который, как известно, в значительной степени влияет на диффузионные процессы. Действительно, при растяжении доля свободного объема увели-

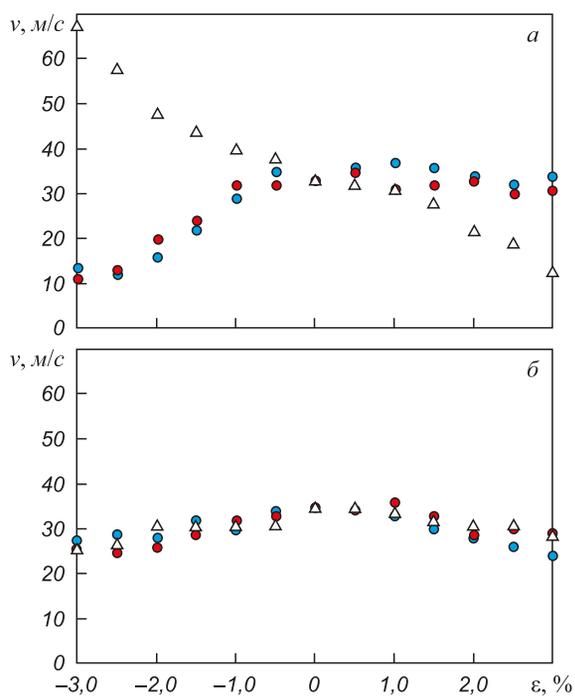


Рис. 3. Скорость миграции границ наклона  $\langle 111 \rangle$  (а) и  $\langle 100 \rangle$  (б) с углом разориентации  $30^\circ$  в зависимости от деформации вдоль осей  $X$  ( $\varepsilon_x$ ),  $Y$  ( $\varepsilon_y$ ) и  $Z$  ( $\varepsilon_z$ ) при температуре 1700 К:  
 $\varepsilon_x$  – ●;  $\varepsilon_y$  – ●;  $\varepsilon_z$  – Δ

Fig. 3. Migration rate of edge boundaries  $\langle 111 \rangle$  (а) and  $\langle 100 \rangle$  (б) with misorientation angle of  $30^\circ$  depending on strain along the  $X$  ( $\varepsilon_x$ ),  $Y$  ( $\varepsilon_y$ ) and  $Z$  ( $\varepsilon_z$ ) axes at temperature of 1700 K:  
 $\varepsilon_x$  – ●;  $\varepsilon_y$  – ●;  $\varepsilon_z$  – Δ

чивается, и такие процессы, как, например, переползание дислокаций, диффузия вдоль дислокационных ядер должны контролироваться степенью деформации. Особенно выделяется «аномальная» зависимость подвижности границ  $\langle 111 \rangle$  от деформации вдоль оси  $Z$ : при сжатии вдоль оси  $Z$  на 3 % скорость миграции границ  $\langle 111 \rangle$  с углом разориентации  $30^\circ$  увеличилась вдвое, а при растяжении – напротив, почти вдвое уменьшилась. В случае границы наклона  $\langle 100 \rangle$  все три зависимости (при деформации вдоль осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) оказались одинаковы (рис. 3, б).

Полученные зависимости свидетельствуют в пользу того, что механизм миграции рассматриваемых границ зерен не содержит диффузионных элементов, то есть осуществляется не за счет переползания дислокаций, одиночных миграций атомов, а, по всей видимости, протекает путем коллективных атомных перестановок, например, сдвигов, скольжений и расщеплений зернограницных дислокаций.

## Выводы

Методами молекулярной динамики проведено исследование влияния деформации вдоль различных направлений относительно мигрирующей границы на скорость миграции границ наклона с осями разориен-

тации  $\langle 100 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$  в никеле. Для рассматриваемых границ получены зависимости скорости миграции при температуре 1700 К от угла разориентации. Показано, что большеугольные границы наклона  $\langle 111 \rangle$  и  $\langle 100 \rangle$  мигрируют приблизительно с одной и той же скоростью, тогда как подвижность малоугловых границ отличается значительно: малоугловые границы  $\langle 111 \rangle$  мигрируют примерно в два раза быстрее границ  $\langle 100 \rangle$ . Получены данные, что почти во всех случаях (как при упругой деформации сжатия, так и при растяжении) скорость миграции рассматриваемых границ замедлялась. Исключением являлся случай деформации вдоль оси наклона границы  $\langle 111 \rangle$ . При сжатии вдоль оси наклона граница  $\langle 111 \rangle$  мигрировала быстрее, при растяжении, наоборот, медленнее. Полученные результаты свидетельствуют в пользу того, что миграция границ наклона осуществляется не за счет диффузионных процессов, как, например, переползания дислокаций, одиночных миграций атомов, а, по всей видимости, путем коллективных атомных перестановок: сдвигов, скольжений и расщеплений зернограницных дислокаций.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кайбышев О.А., Валиев Р.З. Границы зерен и свойства металлов. – М: Металлургия, 1987. – 216 с.
2. Gottstein G., Shvindlerman L.S. Grain Boundary Migration in Metals: Thermodynamics, Kinetics, Applications. Second Edition. – Boca Raton: CRC Press, 2009. – 711 p.
3. Хесснер Ф., Хофман С. Границы зерен рекристаллизационного происхождения. – В кн.: Рекристаллизация металлических материалов / Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1982. С. 71 – 102.
4. Huang Y., Humphreys F.J. Measurements of grain boundary mobility during recrystallization of a single-phase aluminium alloy // *Acta Materialia*. 1999. Vol. 47. P. 2259 – 2268.
5. Huang Y., Humphreys F.J. The effect of solutes on grain boundary mobility during recrystallization and grain growth in some single-phase aluminium alloys // *Materials Chemistry and Physics*. 2012. Vol. 132. P. 166 – 174.
6. Gottstein G., Molodov D.A., Shvindlerman L.S. Grain boundary migration in metals: recent developments // *Interface Science*. 1998. Vol. 6. No. 1-2. P. 7 – 22.
7. Winning M., Rollett A.D., Gottstein G., Srolovitz D.J., Lim A., Shvindlerman L.S. Mobility of low-angle grain boundaries in pure metals // *Philosophical Magazine*. 2010. Vol. 90. No. 22. P. 3107 – 3128.
8. Molodov D.A., Ivanov V.A., Gottstein G. Low angle tilt boundary migration coupled to shear deformation // *Acta Materialia*. 2007. Vol. 55. P. 1843 – 1848.
9. Molodov D.A., Straumal B.B., Shvindlerman L.S. Influence of pressure on the migration of LT on BR 001 RT on BR tilt boundaries in tin bicrystals. *Soviet Physics, Solid State* (English translation of *Fizika Tverdogo Tela*). 1984, vol. 26, no. 4, pp. 629–633.
10. Molodov D.A., Straumal B.B., Shvindlerman L.S. The effect of pressure on migration of  $\langle 001 \rangle$  tilt grain boundaries in tin bicrystals // *Scripta Materialia*. 1984. Vol. 18. No. 3. P. 207 – 211.
11. Yang C.C., Rollett A.D., Mullins W.W. Measuring relative grain boundary energies and mobilities in an aluminum foil from triple junction geometry // *Scripta Materialia*. 2001. Vol. 44. No. 12. P. 2735 – 2740.
12. Rollett A.D., Yang C.C., Mullins W.W., Adams B.L., Wu C.T., Kinderlehrer D., Ta'asan S., Manolache F., Liu C., Livshits I., Mason D., Talukder A., Ozdemir S., Casasent D., Morawiec A., Saylor D., Rohrer G.S., Demirel M., El-Dasher B., Yang W. Grain

- boundary property determination through measurement of triple junction geometry and crystallography. – In Int. Conf. on Grain Growth and Recrystallization, Aachen, Germany, 2001. P. 165 – 176.
13. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч. 1. Дефекты решетки. – М.: Металлургия, 1982. – 280 с.
  14. Gottstein G., Sursaeva V., Shvindlerman L. The effect of triple junctions on grain boundary motion and grain microstructure evolution // *Interface Science*. 1999. Vol. 7. P. 273 – 283.
  15. Upmanyu M., Srolovitz D.J., Shvindlerman L.S., Gottstein G. Triple junction mobility: a molecular dynamics study // *Interface Science*. 1999. Vol. 7. P. 307 – 319.
  16. Upmanyu M., Srolovitz D.J., Shvindlerman L.S., Gottstein G. Molecular dynamics simulation of triple junction migration // *Acta Materialia*. 2002. Vol. 50. P. 1405 – 1420.
  17. Starostenkov M.D., Sinyaev D.V., Rakitin R.Yu., Poletaev G.M. Diffusion mechanisms near tilt grain boundaries in Ni<sub>3</sub>Al intermetallic // *Solid State Phenomena*. 2008. Vol. 139. P. 89 – 94.
  18. Cleri F., Rosato V. Tight-binding potentials for transition metals and alloys // *Physical Review B*. 1993. Vol. 48. P. 22 – 33.
  19. Poletaev G.M., Novoselova D.V., Kaygorodova V.M. The causes of formation of the triple junctions of grain boundaries containing excess free volume in fcc metals at crystallization // *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 249. P. 3 – 8.
  20. Starostenkov M., Poletaev G., Rakitin R., Sinyaev D. Interdiffusion and order fracture over grain boundaries in the deformed Ni<sub>3</sub>Al intermetallic // *Materials Science Forum*. 2008. Vol. 567-568. P. 161 – 164.
  21. Poletaev G.M., Starostenkov M.D. Mutual diffusion at the interface in a two-dimensional Ni-Al system // *Technical Physics Letters*. 2003. Vol. 29. No. 6. P. 454 – 455.
  22. Kulabukhova N.A., Poletaev G.M., Starostenkov M.D., Kulagina V.V., Potekaev A.I. A molecular dynamics study of hydrogen atom diffusion in fcc-metals // *Russian Physics Journal*. 2012. Vol. 54. P. 1394 – 1399.
  23. Fortes M.A., Deus A.M. Effects of triple grain junctions on equilibrium boundary angles and grain growth kinetics // *Materials Science Forum*. 2004. Vol. 455-456. P. 648 – 652.
  24. Perevalova O.B., Konovalova E.V., Koneva N.A., Kozlov E.V. Energy of grain boundaries of different types in fcc solid solutions, ordered alloys and intermetallics with L12 superstructure // *Journal of Materials Science and Technology*. 2003. Vol. 19. P. 593 – 596.
  25. Tucker G.J., Tschopp M.A., McDowell D.L. Evolution of structure and free volume in symmetric tilt grain boundaries during dislocation nucleation // *Acta Materialia*. 2010. Vol. 58. P. 6464 – 6473.

Поступила 20 июня 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 12, pp. 974-979.

## EFFECT OF DEFORMATION ON MIGRATION RATE OF GRAIN BOUNDARIES IN NICKEL

G.M. Poletaev<sup>1</sup>, I.V. Zorya<sup>2</sup>, R.Y. Rakitin<sup>3</sup>, D.V. Kokhanenko<sup>4</sup>, M.D. Starostenkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Altai State Technical University, Barnaul, Altai Territory, Russia

<sup>2</sup>Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia

<sup>3</sup>Altai State University, Barnaul, Altai Territory, Russia

<sup>4</sup>Barnaul branch of the Financial University under the Government of the Russian Federation, Barnaul, Altai Territory, Russia

**Abstract.** Effect of deformation along various directions against migrating boundary on migration rate of edge boundaries with <100> and <111> misorientation axes in nickel was studied by means of molecular dynamics method. Grain boundaries were created in U-shaped model. Force of boundary surface tension, arising from the boundary intension to minimize its energy, was the reason of directed movement of the boundary toward its area decrease. The force provoking migration and migration rate of the boundary remained constant throughout the entire movement of the boundary, gradually decreasing towards the end of computer experiment, which made it possible to measure migration rate quite simply. Effect of uniaxial deformation along the X, Y, Z axes on migration rate of the boundaries was considered. Uniaxial deformation in the model was set at beginning of the computer experiment by changing corresponding interatomic distances along one of the axes. Interactions of nickel atoms with each other were described with the aid of Cleri Rosato many-particle potential constructed in the framework of tight binding model. For the boundaries considered, dependences of migration rate on misorientation angle at temperature of 1700 K were obtained. It is shown that the high-angle <111> and <100> edge boundaries migrate approximately at the same rate, while mobility of low-angle boundaries differs significantly: low-angle <111> boundaries migrate about twice as fast as the <100> boundaries. It was found that in almost all cases, both at elastic compression and tension deformation, migration rate of considered boundaries was slowed down. An exception was the case of deformation along the <111> edge boundary axis. When compressing along the edge axis, <111> boundary migrated faster, while on the contrary, it was slower at tension. The obtained results testify to the fact that migration of edge boundaries is not due to diffusion processes, such as climbing of dislocations, single migrations

of atoms, but, apparently, by collective atomic permutations: shifts, slides and splittings of grain boundary dislocations.

**Keywords:** molecular dynamics, grain boundary, boundary migration, deformation, edge boundary.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-974-979

## REFERENCES

1. Kaibyshev O.A., Valiev R.Z. *Granitsy zeren i svoistva metallov* [Grain boundaries and properties of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 216 p. (In Russ.).
2. Gottstein G., Shvindlerman L.S. *Grain Boundary Migration in Metals: Thermodynamics, Kinetics, Applications*. Second Edition. Boca Raton: CRC Press, 2009, 711 p.
3. Haessner F., Hofmann S. Migration of high angle grain boundaries. In: *Recrystallization of metallic materials*. Haessner F. ed. Stuttgart, Riederer-Verlag, 1978, pp. 63–96. (Russ.ed.: Haessner F., Hofmann S. Granitsy zeren rekristallizatsionnogo proiskhozhdeniya. In: *Rekristallizatsiya metallicheskih materialov*. Moscow: Metallurgiya, 1982, pp. 71–102.)
4. Huang Y., Humphreys F.J. Measurements of grain boundary mobility during recrystallization of a single-phase aluminium alloy. *Acta Materialia*. 1999, vol. 47, pp. 2259–2268.
5. Huang Y., Humphreys F.J. The effect of solutes on grain boundary mobility during recrystallization and grain growth in some single-phase aluminium alloys. *Materials Chemistry and Physics*. 2012, vol. 132, pp. 166–174.
6. Gottstein G., Molodov D.A., Shvindlerman L.S. Grain boundary migration in metals: recent developments. *Interface Science*. 1998, vol. 6, no. 1-2, pp. 7–22.
7. Winning M., Rollett A.D., Gottstein G., Srolovitz D.J., Lim A., Shvindlerman L.S. Mobility of low-angle grain boundaries in pure metals. *Philosophical Magazine*. 2010, vol. 90, no. 22, pp. 3107–3128.
8. Molodov D.A., Ivanov V.A., Gottstein G. Low angle tilt boundary migration coupled to shear deformation. *Acta Materialia*. 2007, vol. 55, pp. 1843–1848.

9. Molodov D.A., Straumal B.B., Shvindlerman L.S. Influence of pressure on the migration of LT an BR 001 RT an BR tilt boundaries in tin bicrystals. *Soviet Physics, Solid State (English translation of Fizika Tverdogo Tela)*. 1984, vol. 26, no. 4, pp. 629–633.
10. Molodov D.A., Straumal B.B., Shvindlerman L.S. The effect of pressure on migration of <001> tilt grain boundaries in tin bicrystals. *Scripta Materialia*. 1984, vol. 18, no. 3, pp. 207–211.
11. Yang C.C., Rollett A.D., Mullins W.W. Measuring relative grain boundary energies and mobilities in an aluminum foil from triple junction geometry. *Scripta Materialia*. 2001, vol. 44, no. 12, pp. 2735–2740.
12. Rollett A.D., Yang C.C., Mullins W.W., Adams B.L., Wu C.T., Kinderlehrer D., Ta'asan S., Manolache F., Liu C., Livshits I., Mason D., Talukder A., Ozdemir S., Casasent D., Morawiec A., Saylor D., Rohrer G.S., Demirel M., El-Dasher B., Yang W. Grain boundary property determination through measurement of triple junction geometry and crystallography. In: *Int. Conf. on Grain Growth and Recrystallization, Aachen, Germany, 2001*, pp. 165–176.
13. Shtremel' M.A. *Prochnost' splavov. Ch. 1. Defekty reshetki* [Alloy strength. Part 1. Lattice defects]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 280 p. (In Russ.).
14. Gottstein G., Sursaeva V., Shvindlerman L. The effect of triple junctions on grain boundary motion and grain microstructure evolution. *Interface Science*. 1999, vol. 7, pp. 273–283.
15. Upmanyu M., Srolovitz D.J., Shvindlerman L.S., Gottstein G. Triple junction mobility: a molecular dynamics study. *Interface Science*. 1999, vol. 7, pp. 307–319.
16. Upmanyu M., Srolovitz D.J., Shvindlerman L.S., Gottstein G. Molecular dynamics simulation of triple junction migration. *Acta Materialia*. 2002, vol. 50, pp. 1405–1420.
17. Starostenkov M.D., Sinyaev D.V., Rakitin R.Yu., Poletaev G.M. Diffusion mechanisms near tilt grain boundaries in Ni<sub>3</sub>Al intermetallic. *Solid State Phenomena*. 2008, vol. 139, pp. 89–94.
18. Cleri F., Rosato V. Tight-binding potentials for transition metals and alloys. *Physical Review B*. 1993, vol. 48, pp. 22–33.
19. Poletaev G.M., Novoselova D.V., Kaygorodova V.M. The causes of formation of the triple junctions of grain boundaries containing excess free volume in FCC metals at crystallization. *Solid State Phenomena*. 2016, vol. 249, pp. 3–8.
20. Starostenkov M., Poletaev G., Rakitin R., Sinyaev D. Interdiffusion and order fracture over grain boundaries in the deformed Ni<sub>3</sub>Al intermetallic. *Materials Science Forum*. 2008, vol. 567-568, pp. 161–164.
21. Poletaev G.M., Starostenkov M.D. Mutual diffusion at the interface in a two-dimensional Ni-Al system. *Technical Physics Letters*. 2003, vol. 29, no. 6, pp. 454–455.
22. Kulabukhova N.A., Poletaev G.M., Starostenkov M.D., Kulagina V.V., Potekaev A.I. A molecular dynamics study of hydrogen-atom diffusion in fcc-metals. *Russian Physics Journal*. 2012, vol. 54, pp. 1394–1399.
23. Fortes M.A., Deus A.M. Effects of triple grain junctions on equilibrium boundary angles and grain growth kinetics. *Materials Science Forum*. 2004, vol. 455-456, pp. 648–652.
24. Perevalova O.B., Konovalova E.V., Koneva N.A., Kozlov E.V. Energy of grain boundaries of different types in FCC solid solutions, ordered alloys and intermetallics with L12 superstructure. *Journal of Materials Science and Technology*. 2003, vol. 19, pp. 593–596.
25. Tucker G.J., Tschopp M.A., McDowell D.L. Evolution of structure and free volume in symmetric tilt grain boundaries during dislocation nucleation. *Acta Materialia*. 2010, vol. 58, pp. 6464–6473.

#### Information about the authors:

**G.M. Poletaev**, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Head of the Chair of Advanced Mathematics and Mathematical Modeling

(gmpoletaev@mail.ru)

**I.V. Zorya**, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Institute of Architecture and Construction

**R.Y. Rakitin**, Cand. Sci. (Phys.-math.), College Director

**D.V. Kokhanenko**, Cand. Sci. (Phys.-math.), Assist. Professor of the Chair of Accounting and IT in Business

**Starostenkov M.D.**, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Head of the Chair of Physics (genphys@mail.ru)

Received June 20, 2018

УДК 621.926.3

## СИЛОВОЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ В КОНУСНОЙ ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЕ

*Сахаров Д.Ф., к.т.н., старший научный сотрудник организационно-научного  
и редакционно-издательского отделения (sacharov\_dima86@mail.ru)*

*Витушкин А.В., к.т.н., преподаватель кафедры боевой, тактико-специальной  
и физической подготовки (mentisoncorpus@gmail.com)*

Кузбасский институт ФСИН России  
(654066, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, пр. Октябрьский, 49)

**Аннотация.** Литература, посвященная проектированию конусных дробильных машин и исследованию процесса дробления в них, в основном базируется на эмпирических наблюдениях, в результате чего общепринятым считается факт о том, что дробимый материал разрушается под действием исключительно сжимающих сил. В свою очередь, формируется теоретическая база, на основе которой создаются дробильные агрегаты. В результате наличия общих сведений существующее на сегодняшний день многообразие конструкций конусных дробильных машин характеризуется общностью их принципов работы. Большинство теоретических работ, посвященных конусным дробильным машинам, ориентированы на такие их характеристики, как производительность, степень дробления, увеличение процента годной фракции в готовом продукте либо на эксплуатационные параметры отдельных элементов конструкции, таких как стойкость футеровочной брони, повышение срока службы опорных и приводных узлов и т.п. Для повышения указанных характеристик разрабатываются конструкции камер дробления, имеющие сложную форму футеровочной брони, а конструкция рабочего органа совмещает в себе элементы рабочих органов других дробильных машин (валковых, щековых). Однако эффективность кинематики движения рабочего органа рассматривается лишь с точки зрения создания в дробимом материале сжимающих сил и минимизации его скольжения относительно дробимого материала. Наибольшее количество энергии, подводимое к любой дробильной машине, расходуется на создание нагрузки, разрушающей дробящийся материал. Авторы настоящей работы считают, что при определенных обстоятельствах в конусных дробильных машинах могут быть созданы такие условия их работы, при которых значительно возрастет энергоэффективность процесса разрушения материалов, подвергающихся дроблению. Одним из таких условий является создание в дробимом материале сложного напряженного состояния. Рассмотрены некоторые характерные конструкции конусных дробильных машин, область применения такого рода дробильных машин. Описан механизм создания в дробимом материале сложного напряженного состояния, способствующего снижению энергетических затрат на процесс дробления. Даны рекомендации по воссозданию условий работы дробильной машины, создающих в дробимом материале сложное напряженное состояние.

**Ключевые слова:** конусная дробилка, силовой анализ, дробление, энергоэффективность, сложное напряженное состояние, касательные напряжения, крутящий момент, конструкция.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-980-986

### ВВЕДЕНИЕ

Производство готовой продукции в результате дробления минералов и руд имеет решающее значение для непрерывного развития современного общества. С ростом населения в мире, растущей урбанизацией и повышением уровня жизни необходимо повышать производительность и эффективность существующих дробилок, чтобы удовлетворить растущий спрос на эти продукты [1].

Среди помольно-дробильных машин большую группу представляют конусные дробилки, характеризующиеся непрерывностью цикла измельчения и способностью к переработке высокопрочных и абразивных материалов, таких как гранит, доменный шлак, щебень, известняк высокой абразивности и т.д. Конусные дробилки нашли широкое применение в промышленности строительных материалов как одного из основного техноло-

гического вида оборудования, применяемого на всех стадиях переработки сырья и материалов [2 – 9].

Процесс дробления был и есть наиболее затратный с точки зрения потребления энергии. Лучшее понимание различных факторов, влияющих на процесс дробления, необходимо для снижения эксплуатационных затрат на измельчение материала [10]. Повышенные энергозатраты при дроблении горных пород конусными дробилками обуславливаются, с одной стороны, большим сопротивлением пород разрушающим сжимающим нагрузкам и, с другой, – резким возрастанием усилий дробления в режиме прессования горной массы [11].

Конусные дробилки обычно используются для ступеней вторичного и третичного измельчения в горнодобывающей промышленности [12], однако существуют и конусные дробилки для крупного дробления, способные принимать куски крупной породы разме-

ром 400 – 1200 мм и шириной разгрузочной щели до 300 мм [13]. Небольшие современные шахты на первичном этапе дробления материала обеспечивают получение продукта размером 4 – 6 дюймов (100 – 150 мм), который затем направляют для дробления на вторичные и третичные конусные дробилки для уменьшения размера материала до требуемого размера готового продукта [14].

Процесс дробления характеризуется отношением размеров кусков исходного материала к размеру кусков готового продукта [13]. Для конусных дробилок это отношение составляет: от 3:1 до 10:1 – первичное дробление; от 6:1 до 8:1 – вторичное дробление; до 10:1 – третичное дробление [15]. В работах, посвященных их проектированию и изучению процесса дробления в них, преобладает мнение о том, что разрушение дробимого материала происходит за счет сжатия куса подвижным и неподвижным конусами. Движение материала при попадании в камеру дробления конусной дробилки описывается тремя различными механизмами: свободное падение, скольжение и сдавливание [16]. При этом известно, что вне зависимости от конструкции конусной дробильной машины она имеет такую особенность рабочего органа, как возможность вращаться. Т.е. подвижный конус в процессе дробления имеет возможность совершать вращательные движения относительно оси неподвижного конуса и своей собственной. Раздавливание материала происходит не сразу, а за счет кругового движения конуса [17].

Проведенные во ВНИИстройдормаше исследования показали, что технико-эксплуатационные характеристики конусных дробилок во многом зависят от траектории движения рабочего органа [18]. Траектория движения подвижного конуса во многом зависит от взаимного положения осей подвижного конуса и точки гирации относительно камеры дробления. Могут быть отмечены три характерные положения точки гирации относительно камеры дробления: вверху, внизу и когда оси дробилки и подвижного конуса параллельны [13].

На рис. 1 представлены основные схемы конусных дробилок в зависимости от их назначения (крупного, среднего и мелкого дробления), из которого видно, что у различных видов конусных дробилок различная геометрия камеры дробления.

По мнению группы исследователей геометрия камеры является одним из ключевых факторов, влияющих на работу конусной дробилки. Конструкция геометрии камеры должна учитывать качество продукции и эффективность дробления [19]. С повышением качества готовой продукции на выходе из дробилки повышается и ее производительность [20].

Повышение качества готового продукта и снижение нагрузки при дроблении материала может быть достигнуто за счет контроля износа рабочих поверхностей, а также оптимальных настроек дробилки. Использование нового поколения систем автоматического конт-

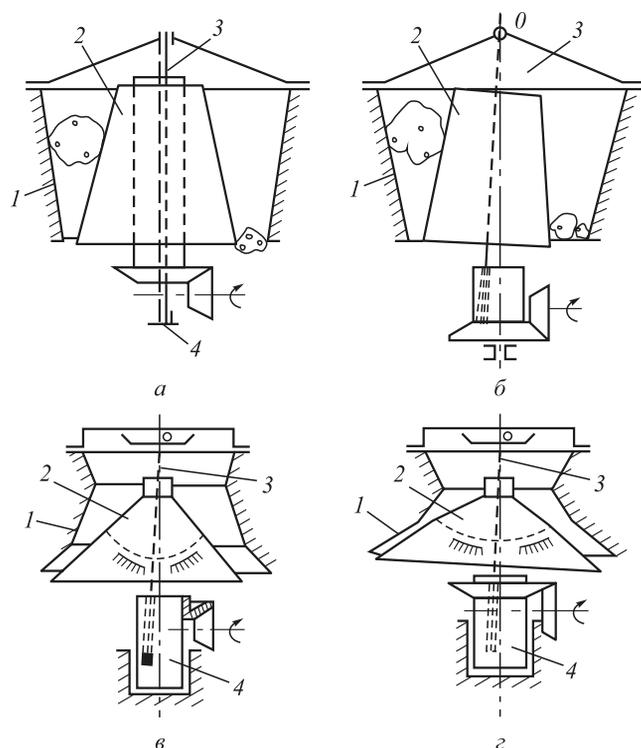


Рис. 1. Схемы основных конусных дробилок (а, б – крупного дробления; в – среднего дробления; г – мелкого дробления): 1 и 2 – неподвижный и подвижный конусы; 3 – ось; 4 – стакан

Fig. 1. Schemes of basic cone crushers (а, б – coarse crushing; в – medium crushing; г – fine crushing): 1 – stationary cone; 2 – movable cone; 3 – axis; 4 – cup

роля конусных дробилок позволит повысить их эффективность [21].

#### **ДРОБЛЕНИЕ ЕДИНИЧНОГО КУСКА ХРУПКОГО МАТЕРИАЛА В КОНУСНОЙ ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЕ**

Для повышения эффективности конусных дробилок необходимо понимание условий, в которых находится кусок материала в камере дробления, т.е. определить, каким силовым воздействиям подвергается кусок, и какие напряжения в результате этого в нем возникают. Для лучшего понимания проведем силовой анализ на примере конусной дробилки крупного дробления (рис. 2). В работе [22] показано, что при описании процесса дробления куски неправильной формы целесообразно аппроксимировать на плоскости в форме квадрата для удобства математических выкладок. Для упрощения расчетов будем принимать, что в камере дробления будет находиться единственный кусок, т.е. дробление будет осуществляться конус – кусок – конус.

Дробление отдельного куса хрупкой породы в дробилках сжимающего двухстороннего воздействия происходит вне зависимости от нахождения в камере дробилки других кусков. Такие процессы принято называть аддитивными, применительно к дробилкам это положение доказано И.Б. Шлаином [23].

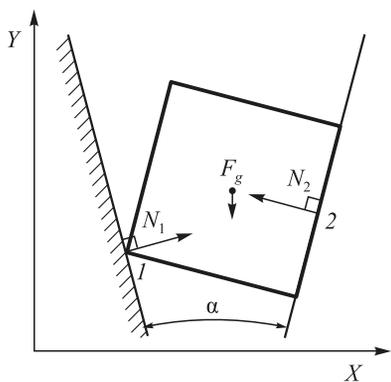


Рис. 2. Положение куска в камере дробления

Fig. 2. Position of the piece in crushing chamber

**СИЛОВОЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ  
В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ**

Вне зависимости от конструкции конусной дробильной машины в вертикальном сечении камера дробления будет представлять собой усеченный конус. Дробимый материал, попадая в камеру дробления, опирается на подвижный и неподвижный конусы на том уровне, на котором расстояние между конусами соответствует размеру куска. На рис. 2 величина  $\alpha$  (угол между неподвижным и подвижным конусом) представляет собой угол захвата.

При соприкосновении дробимого куска с дробильными элементами под действием силы  $F_g$  тяжести куска на него со стороны подвижного и неподвижного конусов действуют силы  $N_1$  и  $N_2$ , направленные перпендикулярно поверхностям дробящих элементов. Под действием системы сил (рис. 3) дробимый кусок находится в равновесном состоянии.

**СТАДИИ ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ В КОНУСНОЙ  
ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЕ**

Рассмотрим процесс дробления. Разложим этот процесс на стадии в зависимости от положения подвижного конуса. Для этого разложим траекторию движения нижней точки конуса на квадранты (рис. 4): видно, что процесс сжатия куска в камере дробления начинается при переходе конуса из второго в третий квадрант. Наибольшее сжатие куска произойдет при завершении движения конуса в четвертом квадранте (когда точки на неподвижном и подвижном конусах сблизятся максимально).

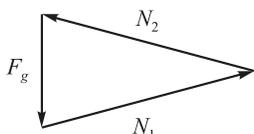


Рис. 3. План сил, действующих на кусок дробимого материала

Fig. 3. Scheme of forces acting on piece of crushing material

Сила нормального давления, возникающая при движении подвижного конуса, многократно превышает силу нормального давления, возникшую под действием силы тяжести. Поэтому последняя в дальнейшем не учитывается ввиду ее незначительности по сравнению с силами, возникающими в процессе дробления материала. Куски, полученные после разрушения, в случае, если их размер меньше разгрузочной щели дробилки, под действием силы тяжести удаляются из камеры дробления.

В процессе движения конуса дробилки под действием сжимающих сил (нормальные силы), которые стремятся вытолкнуть дробимый кусок, возникают силы  $F_{тр1}$  и  $F_{тр2}$  трения куска соответственно о неподвижный и подвижный конусы, направленные в сторону, противоположную действию выталкивающей силы (рис. 5). Совокупность нормальных сил и сил трения, а также образуемый ими силовой многоугольник определяют условия захвата дробимого куска. Условия захвата определяются по методике, аналогичной представленной в работе [13], для конусных и щековых дробилок:

$$2\varphi \geq \alpha,$$

где  $\varphi$  – угол трения между дробильным элементом и куском.

Таким образом, захват куска будет происходить, если угол захвата равен или меньше двойного угла трения.

Следует отметить, что для дробилок среднего (мелкого) дробления условия захвата будут такими же, как

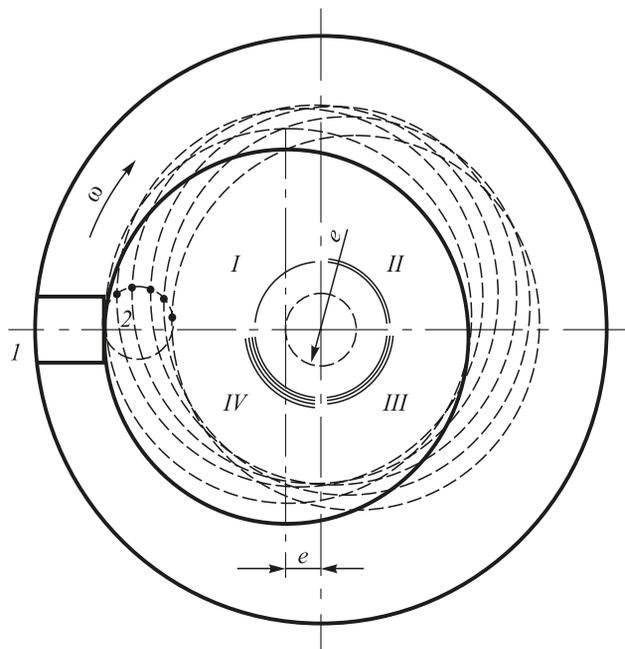


Рис. 4. Движение подвижного конуса и стадии процесса дробления:  $e$  – эксцентриситет;  $\omega$  – угловая скорость вращения подвижного конуса относительно оси неподвижного; I – IV – квадранты

Fig. 4. Movement of movable cone and stages of crushing process:  $e$  – magnitude of eccentricity,  $\omega$  – angular velocity of rotation of movable cone relative to axis of stationary cone; I – IV – quadrants

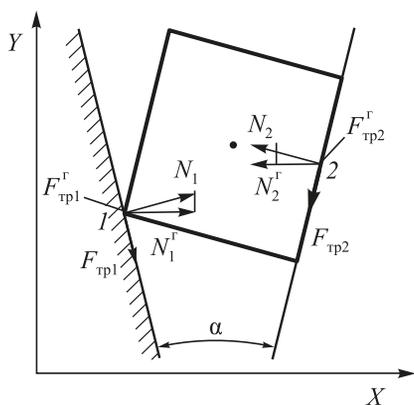


Рис. 5. Силы, действующие на кусок дробимого материала в конусной дробилке

Fig. 5. Forces acting on piece of crushed material in cone crusher

и для дробилок крупного дробления (рис. 6), поскольку проекция всех сил на ось, совпадающая с направлением равнодействующей  $R$  нормальных сил, для дробилок крупного и среднего (мелкого) дробления будет одинаковой.

### СИЛОВОЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

Теперь рассмотрим горизонтальную плоскость. Для этого спроецируем действующие на кусок силы на горизонтальную плоскость (рис. 7).

При движении подвижного конуса между куском и дробильными элементами в горизонтальной плоскости будут возникать силы трения  $F_{тр2}^{r,B}$  и  $F_{тр1}^{r,B}$ . Поскольку кусок дробимого материала опирается на неподвижный конус в двух точках ( $I'$  и  $I''$ ), то результирующие силы в условной точке  $I$  могут быть получены алгебраическим сложением сил, действующих в точках  $I'$  и  $I''$ :

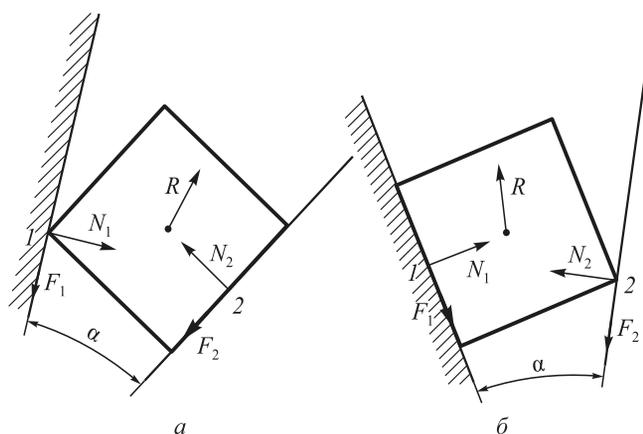


Рис. 6. Сравнительный анализ сил, действующих на кусок дробимого материала в конусной дробилке среднего (мелкого) (а) и крупного (б) дробления

Fig. 6. Comparative analysis of forces acting on a piece of crushing material in cone crusher of medium (fine) (a) and coarse crushing (b)

$$N_1^r = N_{1'}^r + N_{1''}^r;$$

$$F_{тр1}^r = F_{тр1'}^r + F_{тр1''}^r;$$

$$F_{тр1}^{r,B} = F_{тр1'}^{r,B} + F_{тр1''}^{r,B},$$

где  $N_1^r$  – результирующая сила от действия величин  $N_{1'}^r$  и  $N_{1''}^r$ ;  $N_{1'}^r$  и  $N_{1''}^r$  – силы нормального давления, возникающие в точках касания куска и неподвижного конуса (точки  $I'$  и  $I''$ );  $F_{тр1}^r$  – результирующая сила от действия  $F_{тр1'}^r$  и  $F_{тр1''}^r$ ;  $F_{тр1'}^r$  и  $F_{тр1''}^r$  – горизонтальные составляющие сил трения, возникающих в точках касания куска и неподвижного конуса (точки  $I'$  и  $I''$ ) и препятствующих выталкиванию куска из дробилки;  $F_{тр1}^{r,B}$  – результирующая сила от действия сил трения  $F_{тр1'}^{r,B}$  и  $F_{тр1''}^{r,B}$ ;  $F_{тр1'}^{r,B}$  и  $F_{тр1''}^{r,B}$  – силы трения в горизонтальной плоскости, возникающие между неподвижным конусом и дробимым куском (точки  $I'$  и  $I''$ ) в процессе движения подвижного конуса.

Как известно, подвижный конус дробилки имеет две степени свободы и при дроблении может совершать сложное движение, состоящее из собственного вращения  $\omega_2$  вокруг собственной оси и переносного вращения  $\omega_1$  оси подвижного конуса относительно оси дробилки. Вектор переносной угловой скорости подвижного конуса  $\omega_1$  равен вектору угловой скорости эксцентрика. Вектор угловой скорости  $\omega_2$  собственного вращения подвижного конуса зависит от соотношения силы трения в опорах подвижного конуса и сил трения, которые возникают в камере дробления на рабочей поверхности подвижного конуса от взаимодействия с дробимым материалом [13].

В случае, если подвижный конус имеет возможность свободного вращения вокруг своей оси, то из-за возникающих сил трения  $F_{тр2}^{r,B}$  и  $F_{тр1}^{r,B}$  подвижный конус будет вращаться в сторону, обратную переносному вращению

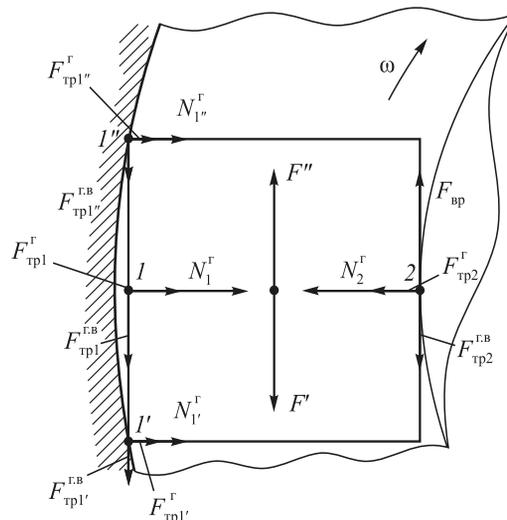


Рис. 7. Анализ сил, действующих на дробимый кусок в горизонтальной плоскости

Fig. 7. Analysis of forces acting on crushed piece in horizontal plane

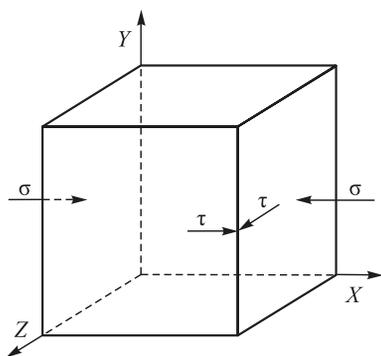


Рис. 8. Напряжения, действующие на точку, расположенную на дробимом куске

Fig. 8. Stresses acting on the point, located at crushing piece

подвижного конуса (силы трения в опорах подвижного конуса меньше сил трения между куском и рабочей поверхностью дробильного элемента).

При отсутствии собственного вращения подвижного конуса при его движении (или в случае, когда подвижному конусу передается вращение в сторону движения подвижного конуса) на дробимый кусок будет действовать сила  $F_{вр}$  (рис. 7).

Для определения закона движения куска под действием возникающей при вращении подвижного конуса силы  $F_{вр}$  необходимо в центре тяжести сечения этого куска приложить две равные по величине и противоположные по направления силы  $F'$  и  $F''$ ;  $F_{вр}$  при этом равновесие тела не изменится. Тогда сила  $F''$  будет стремиться переместить (скольжение куска в камере дробления) кусок дробимого материала, а пара сил  $F_{вр}$  и  $F'$  создает крутящий момент, под действием которого кусок будет стремиться повернуться. Поскольку в реальных условиях в камере дробления разрушаются куски неправильной формы, то произойдет заклинивание дробимого куска по рабочей поверхности неподвижного конуса (в приведенном случае при рассмотрении дробимого куска квадратного сечения также происходит заклинивание). Тогда в точках контакта куска и неподвижного конуса возникнет реактивная сила и, соответственно, момент  $M$ , который будет уравновешивать кусок и не даст ему повернуться. Под действием внешнего момента, образованного парой сил трения, в дробимом куске возникает внутренний крутящий момент, вызывающий действие касательных напряжений. При этом силы трения  $F_{тр2}^{Г,В}$  и  $F_{тр1}^{Г,В}$  будут направлены в сторону, обратную движению куска, т.е. в противоположную действию силы  $F''$ .

Из проведенного силового анализа в горизонтальной и вертикальной плоскостях следует, что на кусок дробимого материала действуют как сжимающие силы (равнодействующая горизонтальной составляющей силы нормального давления  $N_2^Г$  и горизонтальной составляющей силы трения  $F_{тр2}^Г$  со стороны неподвижного конуса и равная ей по величине сила со стороны

неподвижного конуса) (рис. 5, 7), вызывающие в куске действие нормальных напряжений, так и крутящий момент, вызывающий действие касательных напряжений. Таким образом, в дробимом куске создается сложное напряженное состояние с одновременным действием нормальных и касательных напряжений.

### АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КУСКА ДРОБИМОГО МАТЕРИАЛА В КОНУСНОЙ ДРОБИЛЬНОЙ МАШИНЕ

Для анализа напряженного состояния выбрана произвольная точка, взятая на куске дробимого материала (рис. 8). Главные напряжения в этой точке дробимого куска выражаются через напряжения на площадке его поперечного сечения, проходящей через эту точку [24, 25].

Разрушение дробимого куска определяется касательными напряжениями, максимальная величина которых достигается в площадках, ориентированных под углом  $45^\circ$  к главным площадкам [26]. Максимальное касательное напряжение в дробимом куске может быть рассчитано по уравнению:

$$\tau = \frac{\sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2}}{2},$$

где  $\sigma$  – нормальные напряжения;  $\tau$  – касательные напряжения.

В конусной дробилке с параллельными осями дробилки и подвижного конуса (рис. 1, а) может быть реализовано движение подвижного конуса, когда ему передается вращение в сторону своего движения при условии жесткой фиксации конуса на оси. В таком случае величина  $F_{вр}$  будет большей, чем при прочих условиях, а значит, будет больше и крутящий момент, в результате потребуется меньшее усилие для разрушения дробимого материала.

### Выводы

Проведенный силовой анализ в конусной дробилке показал, что при определенных условиях в процессе дробления материала на него помимо сжимающих усилий действует и крутящий момент, в результате чего в дробимом куске возникает сложное напряженное состояние, а значит в куске появляются нормальные и касательные напряжения. Наибольшая эффективность конусных дробилок будет достигнута, если подвижный конус будет вращаться в сторону своего движения. Тогда на кусок будет действовать сила  $F_{вр}$ , в результате в куске возникнет внутренний крутящий момент. Такое движение может быть реализовано в конусных дробилках с параллельными осями дробилки и подвижного конуса в случае жесткой фиксации подвижного конуса на оси. Разрушение куска будет происходить по плоскостям

тям максимальных касательных напряжений, ориентированных под углом  $45^\circ$  к главным площадкам.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Lee E., Evertsson C.M. A comparative study between cone crushers and theoretically optimal crushing sequences. // *Minerals Engineering*. 2011. P. 188 – 194.
- Демченко С.Е. Совершенствование процесса измельчения в конусной инерционной дробилке: Автореф. дис. к.т.н. – Белгород, 2007. – 21 с.
- Алехин А.Г., Водопьянов И.Л. Деформации элементов щековых дробилок со сложным движением щеки при попадании в них металлических предметов // *Строительные и дорожные машины*. 1976. № 2. С. 30 – 32.
- Афанасьев М.М., Зарогатский Л.П., Нагаев Р.Ф. Динамика рабочего органа конусной дробилки // *Машиноведение*. 1976. № 6. С. 8 – 14.
- Баранов В.Ф. Применение технологии мокрого дробления за рубежом // *Обогащение руд*. 2000. № 1. С. 43 – 48.
- Емелин М.А. Новые методы разрушения горных пород. – М.: Недра, 1990. – 240 с.
- Котельников Б.Д., Червяков С.А. Новые машины и оборудование для горной промышленности // *Изв. вуз. Горный журнал*. 1997. № 3. С. 17 – 20.
- Ушаков В.С. Определение зоны подпрессовки в конусных дробилках мелкого дробления // *Строительные и дорожные машины*. 1975. № 2. С. 24 – 26.
- Siemens T. *Ore dressing. Principles and practice*. – New-York, London, 1924. – 330 p.
- Terva J., Kuokkala V.-T., Valtonen K., Siitonen P. Effects of compression and sliding on the wear and energy consumption in mineral crushing // *Wear*. 2018. Vol. 398-399. P. 116 – 126.
- Червяков С.А. Обоснование конструктивных и режимных параметров энергосберегающих конструкций конусных дробилок: Автореф. дис. к.т.н. – Екатеринбург, 2004. – 19 с.
- Johansson M., Quist J., Evertsson M., Hulthén E. Cone crusher performance evaluation using DEM simulations and laboratory experiments for model validation // *Minerals Engineering*. 2017. Vol. 103-104. P. 93 – 101.
- Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
- Jack de la Vergne. *Hard Rock Miner's Handbook*. – Edmonton, Alberta, Canada: Stantec Consulting, 2008. – 330 p.
- Gupta A., Yan D.S. *Mineral Processing Design and Operation. An Introduction*. Elsevier Science, 2006. – 718 p.
- Evertsson C. M. Output prediction of cone crushers // *Minerals Engineering*. 1998. Vol. 11. Issue 3. P. 215 – 231.
- Gröndahl A., Asbjörnsson G., Hulthén E., Evertsson M. Diagnostics of cone crusher feed segregation using power draw measurements // *Minerals Engineering*. 2018. Vol. 127. P. 15 – 21.
- Клушанцев Б.В. Валковые дробилки. Их параметры и метод расчета мощности // *Строительные и дорожные машины*. № 8. С. 23, 24.
- Dong Gang, Huang Dongming, Fan Xiumin Cone crusher chamber optimization using multiple constraints // *International Journal of Mineral Processing*. 2009. Vol. 93. Issue 2. 1 October. P. 204 – 208.
- Lee E., Evertsson M. Implementation of optimized compressive crushing in full scale experiments // *Minerals Engineering*. 2013. Vol. 43-44. P. 135 – 147.
- Moshgbar M., Bearman R.A., Parkin R. Optimum control of cone crushers utilizing an adaptive strategy for wear compensation // *Minerals Engineering*. 1995. Vol. 8. Issue 4-5. P. 367 – 376.
- Витушкин А.В. Разработка кинематической схемы и методов расчета параметров дробильной машины с поступательным движением щеки: Автореф. дис. к.т.н. – Новокузнецк, 2013. – 18 с.
- Шлаин И.Б. Разработка месторождений карбонатных пород. – М.: Недра, 1968. – 293 с.
- Никитин А.Г., Лактионов С.А., Сахаров Д.Ф. Математическая модель процесса разрушения хрупкого материала в одновалковой дробилке // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2012. № 8. С. 36 – 38.
- Сахаров Д.Ф. Анализ процесса дробления хрупких материалов в одновалковой дробилке с целью повышения энергоэффективности: Автореф. дис. к.т.н. – Новокузнецк, 2011. – 19 с.
- Никитин А.Г., Лактионов С.А., Кузнецов М.А. Положение плоскости максимальных касательных напряжений при разрушении хрупкого куска в одновалковой дробилке // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2013. № 7. С. 42 – 44.

Поступила 22 августа 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. NO. 12, pp. 980–986.

## POWER ANALYSIS OF THE CRUSHING PROCESS IN A CONE CRUSHER

*D.F. Sakharov, A.V. Vitushkin*

**Kuzbass Institute of the FPS of Russia, Novokuznetsk, Kemerovo Region, Russia**

**Abstract.** The literature devoted to cone crushers design and research of its crushing process is generally based on empirical observations, therefore it is commonly considered that material is crushed under the influence of squeezing forces exclusively. Above mentioned literature, in turn, theoretical base forms for crushing units design. Based on common understanding, variety of designs of cone crushing machines existing today is characterized by integrity of principles of their work. Majority of theoretical works devoted to cone crushers are focused on such characteristics as efficiency, extent of crushing, increase in percent of useful fraction in ultimate product, or on operational parameters of separate structural elements such as lining armor resistance, increase in endurance of supporting and power nodes, etc. To increase those characteristics crushing cameras with irregular shape of lining armor are designed, design of an active crushing member combines elements of active members of

other crushing machines (roll, cheek crushers). However effectiveness of kinematics of active member movement is considered only from the point of view of squeezing forces generation in crushed material and minimization of its slide against it. The uppermost energy brought to any crushing machines is spent on loading destroying crushed material. Authors of this article consider that under particular circumstances such work conditions can be provided in cone crushers under which energy efficiency of materials crushing process will increase considerably. One of such conditions is creation of multi-axial stress in crushed material. Some reference designs of cone crushers are considered in the article as well as range of their application. Mechanism of multi-axial stress generation in crushed material promoting decrease in energy consumption of crushing process is described. Recommendations on development of operating conditions of crushing machine creating multi-axial stress in crushed material are provided.

**Keywords:** cone crusher, power analysis, crushing, energy efficiency, multi-axial stress, tangent stress, torque, design.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-12-980-986

REFERENCES

1. Lee E., Evertsson C.M. A comparative study between cone crushers and theoretically optimal crushing sequences. *Minerals Engineering*. 2011, vol. 24, Issue 3–4, February–March, pp. 188–194.
2. Demchenko S.E. *Sovershenstvovanie protsessa izmel'cheniya v konusnoi inertsiionnoi drobilke: avtoref. dis... kand. tekh. nauk* [Improving grinding process in a cone inertial crusher: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Belgorod, 2007, 21 p. (In Russ.).
3. Alekhin A.G., Vodop'yanov I.L. Deformations of elements of jaw crushers with complex movement of jaws at ingress of metal objects in them. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 1976, no. 2, pp. 30–32. (In Russ.).
4. Afanas'ev M.M., Zarogatskii L.P., Nagaev R.F. Dynamics of working body of cone crusher. *Mashinovedenie*. 1976, no. 6, pp. 8–14. (In Russ.).
5. Baranov B.F. Application of wet crushing technology abroad. *Obo-gashchenie rud*. 2000, no. 1, pp. 43–48. (In Russ.).
6. Emelin M.A. *Novye metody razrusheniya gornyykh porod* [New methods of rock destruction]. Moscow: Nedra, 1990, 240 p. (In Russ.).
7. Kotel'nikov B.D., Chervyakov S.A. New machines and equipment for mining industry. *Izv. vuz. Gornyi zhurnal*. 1997, no. 3, pp. 17–20. (In Russ.).
8. Ushakov B.C. Determination of the pre-press zone in cone crushers of fine crushing. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 1975, no. 2, pp. 24–26. (In Russ.).
9. Siemens T. *Ore dressing. Principles and practice*. New-York, London, 1924, 330 p.
10. Terva J., Kuokkala V.-T., Valtonen K., Siitonen P. Effects of compression and sliding on the wear and energy consumption in mineral crushing. *Wear*. 2018, vol. 398-399, March, pp. 116–126.
11. Chervyakov S.A. *Obosnovanie konstruktivnykh i rezhimnykh parametrov energosberegayushchikh konstruktivnykh konusnykh drobilok: avtoref. dis... kand. tekh. nauk* [Substantiation of constructive and regime parameters of energy-saving constructions of cone crushers: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Ekaterinburg, 2004, 19 p. (In Russ.).
12. Johansson M., Quist J., Evertsson M., Hulthén E. Cone crusher performance evaluation using DEM simulations and laboratory experiments for model validation. *Minerals Engineering*. 2017, vol. 103-104, April, pp. 93–101.
13. Klushantsev B.V., Kosarev A.I., Muizemnek Yu.A. *Droilki* [Crushers]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 320 p. (In Russ.).
14. Jack de la Vergne. *Hard Rock Miner's Handbook*. Edmonton, Alberta, Canada: Stantec Consulting, 2008, 330 p.
15. Gupta A., Yan D.S. *Mineral Processing Design and Operation. An Introduction*. Elsevier Science, 2006, 718 p.
16. Evertsson C.M. Output prediction of cone crushers. *Minerals Engineering*. 1998, vol. 11, Issue 3, March, pp. 215–231.
17. Gröndahl A., Asbjörnsson G., Hulthén E., Evertsson M. Diagnostics of cone crusher feed segregation using power draw measurements. *Minerals Engineering*. 2018, vol. 127, October, pp. 15–21.
18. Klushantsev B.V. Roller crushers. Parameters and method of power design. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny*. 1982, no. 8, pp. 23–24. (In Russ.).
19. Dong Gang, Huang Dongming, Fan Xiumin. Cone crusher chamber optimization using multiple constraints. *International Journal of Mineral Processing*. 2009, vol. 93, Issue 2, 1 October, pp. 204–208.
20. Lee E., Evertsson M. Implementation of optimized compressive crushing in full scale experiments. *Minerals Engineering*. 2013, vol. 43-44, April, pp. 135–147.
21. Moshghbar M., Bearman R.A., Parkin R. Optimum control of cone crushers utilizing an adaptive strategy for wear compensation. *Minerals Engineering*. 1995, vol. 8, Issue 4-5, April–May, pp. 367–376.
22. Vitushkin A.V. *Razrabotka kinematicheskoi skhemy i metodov rascheta parametrov drobil'noi mashiny s postupatel'nym dvizheniem shcheki: avtoref. dis... kand. tekh. nauk* [Development of kinematic scheme and methods for calculating parameters of crushing machine with translational motion of jaws: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Novokuznetsk, 2013, 18 p. (In Russ.).
23. Shlain I.B. *Razrabotka mestorozhdenii karbonatnykh porod* [Development of carbonate rocks deposits]. Moscow: Nedra, 1968, 293 p. (In Russ.).
24. Nikitin A.G., Laktionov S.A., Sakharov D.F. Mathematical model of process of deterioration of a brittle material in a single-roll crusher. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 8, pp. 36–38. (In Russ.).
25. Sakharov D.F. *Analiz protsessa drobleniya khrupkikh materialov v odnovalkovoi drobilke s tsel'yu povysheniya energoeffektivnosti: avtoref. dis... kand. tekh. nauk* [Analysis of the process of fragile materials crushing in single-roll crusher in order to increase energy efficiency: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Novokuznetsk, 2011, 19 p. (In Russ.).
26. Nikitin A.G., Laktionov S.A., Kuznetsov M.A. Position of plane of maximum shear stress at fracture of brittle pieces in roll crushers. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 7, pp. 42–44. (In Russ.).

Information about the authors:

**Sakharov D.F.**, Cand. Sci. Eng., Senior Researcher of the Organizational, Scientific and Publishing Department (sacharov\_dima86@mail.ru)  
**Vitushkin A.V.**, Cand. Sci. Eng., Lecturer of Chair of Military, Special Tactic and Physical Training (mentisoncorpus@gmail.com)

Received August 22, 2018

УДК 669.181.28.004.82

## ШЛАКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ

**Беланов И.П.<sup>1</sup>**, к.б.н., научный сотрудник (bel\_ivan@rambler.ru)  
**Наумова Н.Б.<sup>1</sup>**, к.б.н., старший научный сотрудник (nnaumova@mail.ru)  
**Семина И.С.<sup>2</sup>**, к.б.н., доцент кафедры геологии, геодезии и безопасности  
жизнедеятельности (semina.i@mail.ru)  
**Савенков О.А.<sup>1</sup>**, к.б.н., научный сотрудник (oleg.a.savenkov@mail.ru)

<sup>1</sup> Институт почвоведения и агрохимии СО РАН  
(630090, Россия, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 8/2)  
<sup>2</sup> Сибирский государственный индустриальный университет  
(654007, Россия, Кемеровская обл., Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Приведены результаты полевого микроделяночного опыта по отработке технологии применения щебня шлакового для разрушения капиллярной каймы при рекультивации токсичных отходов (хвостохранилищ обогатительных фабрик, полигонов захоронения ТБО и др.) с минимальным нанесением плодородного слоя почвы. Такой подход позволяет утилизировать отходы черной металлургии при внедрении малозатратных энергосберегающих технологий. В качестве объектов исследования использовали четыре основных вида шлака, получаемого на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» при различных технологиях плавки металла: белый обезжелезненный, доменный (мартеновский), электросталеплавильный и конвертерный. Эти шлаки использовали в качестве инертного материала под минимальным плодородным слоем почвы на делянках опыта, где высевали многолетние травы (злаково-бобовую смесь). На каждом варианте шлака были контрольный (без внесения удобрения) вариант и варианты с внесением гуминового препарата калия, полного минерального удобрения, а также с их совместным использованием. В конце вегетации определяли надземную фитомассу. Фитомасса надземной продукции растений изменялась в пределах 17 – 128 г/м<sup>2</sup>. Установлено, что наиболее благоприятными свойствами обладают щебень шлаковый конвертерный и доменный, имеющие меньшую фитотоксичность. Внесение минерального удобрения как отдельно, так и с гуматом калия привело к увеличению фитомассы в 2 – 4 раза. Гумат калия, внесенный отдельно, не влиял на продукцию растений, но на фоне нитрофоски увеличивал фитомассу в 1,6 – 1,8 раза. Для повышения всхожести многолетних трав и стимулирования их биологической продуктивности рекомендуется совместное внесение минеральных удобрений и гуминовых препаратов. Щебни шлаковые конвертерный и доменный можно использовать в качестве инертного материала при рекультивации согласно технологии минимального нанесения плодородного слоя почвы. Шлаки белый и электросталеплавильный не рекомендовано использовать в качестве инертного материала из-за их высокой фитотоксичности, отрицательно влияющей на рост и развитие используемых при рекультивации многолетних трав.

**Ключевые слова:** микрополевой опыт, щебень шлаковый, инертный материал, фитотоксичность, надземная фитомасса, рекультивация.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-987-992

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных отходов металлургического производства является шлак – легкоплавкий силикатный материал, образующийся в виде расплава оксидов в процессе выплавки металла и представляющий собой смесь крупнообломочных, песчаных, пылеватых частиц. Согласно технологии шлаки складывают на открытых участках в виде отвалов. Такое размещение может приводить к поступлению загрязняющих веществ в воздух, водоемы и почвы, что отрицательно сказывается на состоянии флоры, фауны и здоровье населения [1 – 3].

Проблема избыточного накопления шлаков и их негативного воздействия на естественную среду наиболее ярко проявляется в крупных индустриальных центрах черной металлургии [4 – 6]. По некоторым оценкам на

предприятиях черной металлургии России ежегодно накапливается более 40 млн. т шлаков [7]. Одним из экологически напряженных регионов является Новокузнецкая агломерация Кемеровской области, где функционирует гигант черной металлургии АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Таким образом, консервация и дальнейшая утилизация путем вторичной переработки шлаковых отходов в настоящее время являются очень актуальными для этого региона.

Существующие технологии позволяют вовлекать шлаки металлургического производства в различные отрасли народного хозяйства. Например, эти отходы используют в качестве материала при строительстве дамб и дорожной одежды, отсыпки оснований зданий и сооружений, заполнения отработанных карьерных и шахтных выработок, как добавки в строительные смеси, как удобрения, содержащие кальций и магний, мелиоранты

и т.п. [8 – 12]. Шлаки можно применять при рекультивации токсичных техногенных объектов: хвостохранилищ обогатительных фабрик, полигонов захоронения ТБО и других. Поскольку проведение горно-технического этапа рекультивации такого рода объектов требует использования инертных материалов [13], перспективным материалом для этих целей может выступать щебень шлаковый металлургический.

Проведена оценка возможности применения различного рода металлургических шлаков в качестве инертного материала для разрушения капиллярной каймы при рекультивации токсичных отходов. Предпосылкой для проведения такого опыта является необходимость внедрения ресурсосберегающих технологий, основанных на минимизации мощности наносимого плодородного слоя почвы совместно с интенсивным использованием различного рода почвоулучшителей (минеральных удобрений, гуминовых препаратов или их комплекса). Основным показателем успешного применения металлургического шлака в целях рекультивации (на горнотехническом этапе) является продуктивность травосмеси, используемой на биологическом этапе рекультивации для закрепления рекультивируемого слоя устойчивым развитием травостоя.

#### ■ ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования использовали четыре вида щебня шлакового, получаемого на АО «ЕВРАЗ ЗСМК» при различных технологиях плавки металла: шлак белый обезжелезненный (Б), шлак доменный (мартеновский, Д), шлак электросталеплавильный (Э) и шлак конвертерный (К). Каждый из шлаков прошел предварительную обработку на предприятии ООО «Технологии рециклинга», включающую разрушение спекшейся массы при помощи щековых дробилок, сортировку от включений металла и калибровку на трехъярусных грохотах. В опыте был использован щебень шлаковый фракции 0,5 – 2,5 см, который по заключению компании-переработчика относится к IV классу опасности.

Предварительно каждый из используемых в опыте шлаков прошел биотестирование на фитотоксичность для определения воздействия загрязняющих веществ на флору почвы на основании методики ГОСТ Р ИСО 22030 – 2009 и ИСО11269-2:2012 [14]. Одним из критериев оценки безопасности использования шлаков в качестве инертного материала при рекультивации выступает степень его фитотоксичности [15]. Было установлено, что фитотоксичность отсутствует у шлака К при любых концентрациях его в тестируемой почвенно-шлаковой смеси, а также в чистом виде [14]. Шлак Б при тестировании и с овсом, и с редисом проявил фитотоксичность в чистом виде и при 50 %-ой концентрации разбавления с почвой, при остальных долях разбавления с почвой фитотоксичность не была выявлена. Шла-

ки Д и Э проявили фитотоксичность при концентрациях 50 и 100 % при тестировании с овсом и только в чистом виде – при тестировании с редисом. В целом отмечено, что при снижении доли шлака в общей массе почвенно-шлаковой смеси при разбавлении фитотоксичность не отмечается для всех четырех видов шлаков [14].

Также было проведено исследование на содержание тяжелых металлов, которое не выявило значительных превышений норм ПДК по основным показателям.

#### ■ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В начале вегетационного периода 2017 г. был заложен микроделяночный полевой опыт в районе г. Новокузнецка, имитирующий рекультивацию техногенного объекта с защитным поверхностным водоупорным слоем. В качестве опытных делянок использовали углубленные в естественную почву изолированные пластиковые лотки площадью 1 м<sup>2</sup>. Для снижения краевого температурного градиента применяли заглубление. В каждый лоток послойно помещали один из видов шлакового щебня мощностью 0,2 м, поверх которого насыпали плодородный слой почвы мощностью 0,1 м согласно технологии [16]. После чего производили посев травосмеси с нормой высева *Melilotus albus* – 7 кг/га, *Festuca pratensis* – 11 кг/га, *Phleum pratense* – 11 кг/га, *Lolium perenne* – 5 кг/га.

Для отработки такой технологии рекультивации были использованы четыре варианта посева многолетних трав: без внесения удобрений; с внесением минерального удобрения нитрофоски (16 % N, 16 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 16 % K<sub>2</sub>O); с внесением калиевого гуминового препарата (0,02 %); с совместным внесением минерального удобрения с калиевым гуминовым препаратом. Каждый из вариантов был заложен в двукратной повторности. В период вегетации дополнительный полив не проводили, так как дефицит влаги компенсировался дождевыми осадками. В начале сентября был произведен укос и определена сформированная надземная фитомасса для каждого варианта опыта. В настоящее время этот подход наиболее популярен в промышленной ботанике при оценке эффективности рекультивации и правильности выбора той или иной технологии [17].

Статистическую обработку полученных данных проводили методами описательной статистики и анализа главных компонент с помощью пакета Statistica 6.0.

Продукция агроценоза различных вариантов опыта напрямую зависела от используемого в качестве инертного материала шлака и степени его фитотоксичности. Наилучший результат без внесения удобрений был получен на делянках, где использовали шлак К с наименьшей фитотоксичностью (см. таблицу). При проективном покрытии до 50 % основная (75 %) доля фитомассы приходилась на *Melilotus albus*, занимающего 21 % в составе травосмеси. Удовлетворительный результат

был получен при использовании шлака Д, на делянках с которым, однако, проективное покрытие снизилось до 30 %. Основную долю фитомассы, как и на делянках со шлаком К, составил донник. При использовании в качестве инертного материала шлаков Б и Э сказывалась их фитотоксичность: всходы были неравномерны, молодые растения угнетены и относительно быстро погибали, площадь проективного покрытия была менее 10 %, а продукция надземной фитомассы – минимальна среди всех вариантов опыта.

Послепосевной полив 0,02 %-ым раствором гумата калия ускорил прорастание семян травосмеси на 1 – 3 дня, однако в итоге не привел к статистически значимому увеличению фитомассы. Внесение полного минерального удобрения стимулировало продукционный процесс растений, при этом при совместном внесении с минеральным удобрением гумат калия вызывал существенное увеличение фитомассы как у злаковых (в 1,6 раза), так и у бобовых (в 1,8 раза). Вероятнее всего, стимулирование процессов продукции и трансформации растительного вещества и питательных элементов внесением минерального удобрения способствовало в изучаемых почвосубстратах развитию и функционированию комплекса почвенных микроорганизмов, воздействие гумата на который и могло привести к более интенсивному поступлению в почву элемен-

тов питания, прежде всего азота [17 – 19]. Тем не менее на участках с использованием шлаков Б и Э растения находились в угнетенном состоянии, как и в вариантах без внесения удобрений.

Использование для подкормки растений минерального удобрения с равной (по 16 %) долей NPK оказало благоприятное и четко выраженное воздействие на рост и развитие травосмеси на делянках со шлаками К и Д (см. таблицу). Хотя всходы многолетних трав на этих делянках были одновременны с контрольными участками, они имели более равномерный характер с преобладанием злаков в проективном покрытии на начальном этапе роста и развития. Прибавка фитомассы относительно контрольного варианта увеличилась в 1,5 – 4,0 раза на различных делянках.

Максимальная надземная фитомасса высеянной травосмеси была получена при совместном внесении гумата калия и нитрофоски. Хороший результат показали делянки со шлаком Д, где на долю бобовых приходилось 98 %. Наилучший результат был получен на участках со шлаком К в качестве инертного субстрата, хотя надземная фитомасса и была невысока (см. таблицу), соотношение фитомассы злаковых (28 %) и бобовых (72 %) было сдвинуто в пользу последних, т.е. благоприятно для дальнейшего развития высеянного травяного агроценоза и его последующей сукцессии [20]. На

**Надземная фитомасса трав и агрохимическая характеристика корнеобитаемого слоя (по окончании вегетации) на делянках с использованием различного рода щебня шлакового в качестве инертного материала и разных почвоулучшителей**

**Aboveground phytomass of herbs and chemical properties of root layer (at the end of vegetation) in microplots with different slag types and fertilizer addition**

Используемый инертный материал	Вид внесенного почвоулучшителя	Фитомасса, г/м <sup>2</sup> , воздушно-сухой массы			рН	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг	NO <sub>3</sub> , мг/кг	K <sub>2</sub> O, мг/кг
		Злаки	Бобовые	Всего				
Шлак белый	Контроль (без внесения)	0,2	0,2	0,4	10,8	3	7	125
	Гумат калия	0,4	0,2	0,6	10,4	4	11	140
	Нитрофоска	0,4	2,2	2,6	9,5	6	12	150
	Нитрофоска + гумат калия	2,3	1,9	4,2	9,5	6	14	155
Шлак доменный	Контроль (без внесения)	4,4	12,6	17,0	8,7	27	14	80
	Гумат калия	10,0	14,6	24,6	8,4	27	16	140
	Нитрофоска	9,9	64,4	74,3	7,9	41	25	215
	Нитрофоска + гумат калия	18,0	109,8	127,8	7,5	44	25	210
Шлак электросталеплавильный	Контроль (без внесения)	0,2	0,5	0,7	10,7	2,5	9	40
	Гумат калия	0,8	1,0	1,8	9,6	3	15	60
	Нитрофоска	2,7	1,7	4,4	9,1	3,5	20	150
	Нитрофоска + гумат калия	2,3	21,8	24,1	8,8	8	22	185
Шлак конверторный	Контроль (без внесения)	11,3	33,5	44,8	7,9	11	7	50
	Гумат калия	12,2	35,3	47,5	7,4	16	15	85
	Нитрофоска	15,0	38,7	53,7	7,1	27	18	115
	Нитрофоска + гумат калия	22,6	57,5	80,1	7,1	2	23	120

делянках со шлаками Б и Э тоже отмечали прибавку фитомассы относительно контроля, но в целом результат был неудовлетворительный.

Возможно, что определяющими фитотоксичность металлургических шлаков могли быть их физико-химические свойства и прежде всего щелочная среда и избыток свободных катионов  $\text{Ca}^+$  (средняя массовая доля  $\text{CaO}$  составила 31 – 44 %) и  $\text{Fe}^+$  (средняя массовая доля  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  – 10 – 21 %). Эти металлы, по-видимому, влияли на доступность для растений основных элементов минерального питания, даже несмотря на их поступление с минеральными удобрениями. В щелочных почвах и почвосубстратах (к которым относятся и исследуемые шлаки) преобладающим типом фосфатов в почвенном растворе является дифосфат ( $\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$ ) [20]; он притягивает катионы кальция, железо, марганца и алюминия с образованием нерастворимых в рассматриваемой почвенной среде соединений, недоступных для растений.

Таким образом, использование изученных шлаков при рекультивации требует обязательного снижения величины рН до 7 – 8, что не даст возможности переходу доступного для растений фосфора в труднодоступные фосфаты железа и алюминия.

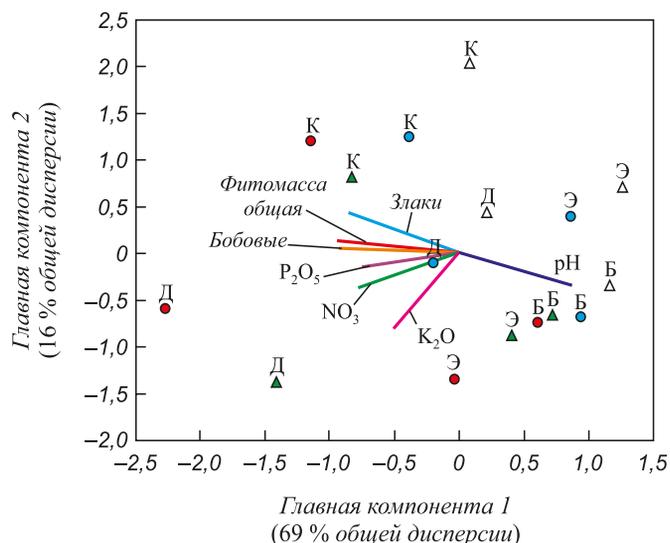
Реакция (рН) среды для шлаков Б и К характеризуется как сильнощелочная, для Д и Э – как щелочная и слабощелочная соответственно. Граница щелочности для всех исследуемых шлаков смещалась в сторону нейтральной при использовании как гумата калия, так и минерального удобрения. Этот эффект был замечен при совместном использовании гумата калия и минерального удобрения.

Анализ методом главных компонент хорошо визуализирует структуру взаимосвязи различных вариантов опыта с химическими свойствами почвосубстратов и надземной фитомассой трав (см. рисунок): почвошлаки расположены отдельными группами, варианты с внесением (как отдельно, так и совместно с гуматом калия) минерального удобрения расположены обособленно, при этом фитомасса, сформированная на делянке со шлаком Д, сильнее отзывалась на их внесение.

В целом внесение почвоулучшителей положительно влияло на рост и развитие многолетних трав вне зависимости от вида шлака. Наибольшая прибавка продукции надземной фитомассы бобово-злаковой травосмеси была достигнута при совместном использовании гумата калия с минеральным удобрением.

## Выводы

В ходе проведения полевого эксперимента было установлено, что щелочные шлаковые конвертерный и доменный можно использовать в качестве инертного материала при рекультивации согласно технологии минимального нанесения плодородного слоя почвы. Для повышения уровня всходов многолетних трав и стиму-



Коэффициенты корреляции переменных (надземной фитомассы и химических свойств корнеобитаемого слоя почвы) и первых двух главных компонент (любая статистическая величина):

△ – контроль; ● – гумат калия; ▲ – нитрофоска;  
● – гумат калия + нитрофоска

Correlation coefficients of original variables (aboveground phytomass and root layer soil properties) and first 2 principal components (any statistic value):

△ – check; ● – potassium humate; ▲ – nitrophoska;  
● – potassium humate + nitrophoska

лирования их биологической продуктивности рекомендуется совместное внесение минеральных удобрений и гуминовых препаратов. Шлаки белый и электросталеплавильный не рекомендуется использовать в качестве инертного материала из-за их высокой фитотоксичности, отрицательно влияющей на рост и развитие многолетних трав, используемых при рекультивации.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Брызгалов С.В. Снижение негативного воздействия доменных шлаков при их утилизации на объекты гидросферы: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Пермь: изд. ПГТУ, 2009. – 17 с.
2. Пугин К.Г., Вайсман Я.И., Юшков Б.С., Максимович Н.Г. Снижение экологической нагрузки при обращении со шлаками черной металлургии. – Пермь: изд. ПГТУ, 2008. – 316 с.
3. Reuter M., Xiao Y., Boin U. Recycling and environmental issues of metallurgical slags and salt fluxes // VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts. The South African Institute of Mining and Metallurgy. 2004. P. 349 – 356.
4. Ilutiu-Varvara D.A. Researching the Hazardous Potential of Metallurgical Solid Wastes // Polish Journal of Environmental Studies. 2016. Vol. 25. No. 1. P. 147 – 152.
5. Jahangir J., Nematollah K., and Afshin D. Ecological Risk Assessment of Lead (Pb) after Waste Disposal from Metallurgical Industries // Research Journal of Environmental and Earth Sciences. 2010. Vol. 2 (3). P. 139 – 145.
6. Экология Кузбасса: цифры, факты, события. Департамент природных ресурсов и экологии Кемеровской области. Режим доступа: [http://kuzbasseco.ru/?page\\_id=1010](http://kuzbasseco.ru/?page_id=1010) (Дата обращения: 18.04.2016 г.).
7. Gray N.F. Environmental impact and remediation of acide mine drainage: a management problem // Environmental Geol. 1997. Vol. 30. P. 62 – 71.

8. Lind B.B., Fallman A.M., Larsson L.B. Environmental impact of ferrochrome slag in road construction // *Waste Management*. 2001. Vol. 21 (3). P. 255 – 264.
9. Rai A., Prabakar J., Raju C., Morchalle R. Metallurgical slag as a component in blended cement // *Construction and Building Materials*. 2002. No. 16. P. 489 – 494.
10. Старостина Н.Н., Мансурова М.С. Анализ возможности снижения загрязнения окружающей среды при утилизации отходов горного производства // *Экология и безопасность жизнедеятельности*. 2014. № 1. С. 141 – 146.
11. Боброва З.М., Ильина О.Ю., Хохряков А.В., Цейтлин Е.М. Применение отходов горно-металлургических и металлургических производств в целях рационального природопользования // *Изв. Уральского государственного горного университета*. 2015. № 4 (40). С. 16 – 26.
12. Gawor L., Jonczy I. Possibilities of recycling of metallurgical slags and coal mining wastes and reclamation of dumping grounds in Upper Silesian Coal Basin (southern Poland) // *Materials and Geoenvironment*. 2015. Vol. 62. P. 271 – 276.
13. Беланов И.П., Савенков О.А., Наумова Н.Б. Фитотоксичность почвосубстратов на основе шлаков металлургического производства, используемых в рекультивации // *Почвы и окружающая среда*. 2018. № 2 (2). С. 1 – 12.
14. Bunzl K., Trautmannsheimer M., Schramel P., Reifenhauer W. Availability of Arsenic, Copper, Lead, Thallium, and Zinc to Various Vegetables Grown in Slag Contaminated Soils // *Journal of Environmental Quality*. 2001. Vol. 30. P. 934 – 939.
15. Пат. № 2628581 РФ. Способ закрепления поверхности хвосторанилищ с использованием инертных материалов / В.А. Андроханов, Л.Т. Крупская, И.П. Беланов. 2017. Бюл. № 24.
16. Водолеев А.С., Андроханов В.А., Бердова О.В., Юмашева Н.А., Черданцева Е.С. Экологически безопасная консервация отходов железорудного обогащения // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 10. С. 792 – 797.
17. Nardi S., Panuccio M.R., Abenavoli M.R., Muscolo A. Auxin-like effect of humic substances extracted from faeces of *Allolobophora caliginosa* and *A. rosea* // *Soil Biol. Biochem.* 1994. Vol. 26. P. 1341 – 1346.
18. Попов А.И. Гуминовые вещества: свойства, строение, образование. – СПб.: Изд-во С. Петерб. ун-та, 2004. – 248 с.
19. Подурец О.И. Связь динамики запасов растительного вещества с фазами посттехногенного почвообразования // *Вестник Томского государственного университета*. 2011. № 346. С. 169 – 173.
20. Теучеж А.А. Изучение роли подвижного фосфора в системе почва – удобрения – урожай // *Научный журнал КубГАУ*. 2017. № 127 (03). Электронный ресурс. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2017/03/pdf/64.pdf> (Дата обращения: 18.04.2016 г.).

Поступила 14 марта 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. No. 12, pp. 987–992.

## METALLURGICAL PRODUCTION SLAGS – PROMISING MATERIAL FOR TECHNOLOGICAL WASTE RECLAMATION

*I.P. Belanov<sup>1</sup>, N.B. Naumova<sup>1</sup>, I.S. Semina<sup>2</sup>, O.A. Savenkov<sup>1</sup>*

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-987-992

<sup>1</sup>Institute of Soil Science and Agrochemistry Siberian Branch of RAS (ISSA SB RAS), Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>Siberian State Industrial University, Kemerovo Region, Novokuznetsk, Russia

**Abstract.** The article describes results of the microplot field trial to investigate potential use of metallurgical slags for fracture of capillary rim during reclamation of toxic waste dumping areas, such as enrichment plants tailings, solid waste dumps, etc., with minimal possible introduction of fertile soil layer. Such approach allows energy-effective utilization of metallurgical wastes. Four slags, produced at EVRAZ West Siberian plant by different technologies were used: white non-ferrous, blast-furnace, converter and electric furnace slags. These slags were used as an inert material, underlying thin fertile soil layer in experimental microplots, where perennial plants (legume-grass mixture) were sown. For each slag there was check variant (no fertilizer added), and variants with potassium humic agents, and their combination as mineral fertilizers. Aboveground phytomass at the end of the growing season varied from 17 to 128 g/m<sup>2</sup>. Converter and blast furnace slags, which had the least phytotoxicity, appeared to be better inert materials. Mineral fertilizer, introduced itself and combined with humic agents, has increased aboveground phytomass 2 – 4 times as compared with check variant. Used separately, humic agent did not affect plant production, whereas used together with mineral fertilizer, it increased phytomass 1.6 – 1.8 times. Thus combined introduction of mineral fertilizer and humic agents is recommended to stimulate germination ability and phytomass production. Converter and blast furnace slags can be used as inert materials for reclamation with minimal fertile soil layer application, whereas white non-ferrous and electric furnace slags are not recommended for such application due to their high phytotoxicity, negatively affecting growth and development of perennial plants, used for reclamation.

**Keywords:** microplot field trial, slag, underlying inert material, phytotoxicity, aboveground phytomass, reclamation.

### REFERENCES

1. Bryzgalov S.V. *Snizhenie negativnogo vozdeistviya domennykh shlakov pri ikh utilizatsii na ob"ekty gidrosfery: Avtoref. dis... kand. tekh. nauk.* [Reducing negative impact of blast furnace slag being disposed at hydrosphere objects: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Perm: izd. PGU, 2009, 17 p. (In Russ.).
2. Pugin K.G., Vaisman Ya.I., Yushkov B.S., Maksimovich N.G. *Snizhenie ekologicheskoi nagruzki pri obrashchenii so shlakami chernoi metallurgii* [Reducing environmental burden at handling slags of ferrous metallurgy]. Perm: izd. PGU, 2008, 316 p. (In Russ.).
3. Reuter M., Xiao Y., Boin U. Recycling and environmental issues of metallurgical slags and salt fluxes. VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts. *The South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2004, pp. 349–356.
4. Ilutiu-Varvara D.A. Researching the Hazardous Potential of Metallurgical Solid Wastes. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2016, vol. 25, no. 1, pp. 147–152.
5. Jahangir J., Nematollah K., and Afshin D. Ecological Risk Assessment of Lead (Pb) after Waste Disposal from Metallurgical Industries. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*. 2010, vol. 2 (3), pp. 139–145.
6. *Ekologiya Kuzbassa: tsifry, fakty, sobyitiya. Departament prirodnykh resursov i ekologii Kemerovskoi oblasti* [Ecology of Kuzbass: figures, facts, events. Department of Natural Resources and Ecology of the Kemerovo Region]. Electronic resource. Available at URL: [http://kuzbasseco.ru/?page\\_id=1010](http://kuzbasseco.ru/?page_id=1010) (Accessed 18.04.2016). (In Russ.).
7. Gray N.F. Environmental impact and remediation of acide mine drainage: a management problem. *Environmental Geol.* 1997, vol. 30, pp. 62–71.
8. Lind B.B., Fallman A.M., Larsson L.B. Environmental impact of ferrochrome slag in road construction. *Waste Management*. 2001, vol. 21 (3), pp. 255–264.

9. Rai A., Prabakar J., Raju C., Morchalle R. Metallurgical slag as a component in blended cement. *Construction and Building Materials*. 2002, no. 16, pp. 489–494.
10. Starostina N.N., Mansurova M.S. Analysis of possibility of reducing environmental pollution when disposing mining waste dumps. *Ekologiya i bezopasnost' zhiznedejatel'nosti*. 2014, no. 1, pp. 141–146. (In Russ.).
11. Bobrova Z.M., Il'ina O.Yu., Khokhryakov A.V., Tseitlin E.M. Use of mining and metallurgical wastes for environmental management. *Izv. Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2015, no. 4 (40), pp. 16–26. (In Russ.).
12. Gawor L., Jonczy I. Possibilities of recycling of metallurgical slags and coal mining wastes and reclamation of dumping grounds in Upper Silesian Coal Basin (southern Poland). *Materials and Geoenvironment*. 2015, vol. 62, pp. 271–276.
13. Belanov I.P., Savenkov O.A., Naumova N.B. Phytotoxicity of soil substrates based on metallurgical slags used in reclamation. *Pochvy i okruzhayushchaya sreda*. 2018, no. 2 (2), pp. 1–12. (In Russ.).
14. Bunzl K., Trautmannsheimer M., Schramel P., Reifenhäuser W. Availability of Arsenic, Copper, Lead, Thallium, and Zinc to Various Vegetables Grown in Slag Contaminated Soils. *Journal of Environmental Quality*. 2001, vol. 30, pp. 934–939.
15. Androkhanov V.A., Krupskaya L.T., Belanov I.P. *Sposob zakrepleniya poverkhnosti khvostokhranilishch s ispol'zovaniem inertnykh materialov* [Method of fixing tailings dumps surface using inert materials]. Patent RF no. 2628581. *Byulleten' izobretenii*. 2017, no. 24. (In Russ.).
16. Vodoleev A.S., Androkhanov V.A., Berdova O.V., Yumasheva N.A., Cherdantseva E.S. Environmentally safe storage of wastes from iron ore enrichment. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Chernaya metallurgiya*. 2017, vol. 60, no. 10, pp. 792–797. (In Russ.).
17. Nardi S., Panuccio M.R., Abenavoli M.R., Muscolo A. Auxin-like effect of humic substances extracted from faeces of *Allolobophora caliginosa* and *A. rosea*. *Soil Biol. Biochem.* 1994, vol. 26, pp. 1341–1346.
18. Popov A.I. *Guminovye veshchestva: svoystva, stroenie, obrazovanie* [Humic substances: properties, structure, formation]. St. Petersburg: Izd-vo S. Peterb. un-ta, 2004, 248 p. (In Russ.).
19. Podurets O.I. Relation of dynamics of plant matter stocks with phases of post-technogenic soil formation. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2011, no. 346, pp. 169–173. (In Russ.).
20. Teuchezh A.A. Role of mobile phosphorus in soil - fertilizer - harvest system. *Nauchnyi zhurnal KubGAU*. 2017, no. 127 (03). Electronic resource. Available at URL: <http://ej.kubagro.ru/2017/03/pdf/64.pdf> (Accessed 18.04.2016). (In Russ.).

**Information about the authors:**

**I.P. Belanov**, *Cand. Sci.(Biological), Research Associate*  
(bel\_ivan@rambler.ru)

**N.B. Naumova**, *Cand. Sci.(Biological), Senior Researcher*  
(nnaumova@mail.ru)

**I.S. Semina**, *Cand. Sci.(Biological), Assist. Professor of the Chair of Geology, Geodesy and Life Safety* (semina.i@mail.ru)

**O.A. Savenkov**, *Cand. Sci.(Biological), Research Associate*  
(oleg.a.savenkov@mail.ru)

Received March 14, 2018

УДК 536+669.18

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ХРОМСОДЕРЖАЩЕГО РУДНО-ИЗВЕСТКОВОГО РАСПЛАВА\*

**Заякин О.В.**, к.т.н., старший научный сотрудник (zferro@mail.ru)

**Салина В.А.**, к.т.н., старший научный сотрудник (valentina\_salina@mail.ru)

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

Институт металлургии УрО РАН

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

**Аннотация.** Приведены результаты термодинамического моделирования восстановления элементов хромового рудно-известкового расплава с применением в качестве восстановителя кремния ферросиликоникеля в зависимости от температуры. Установлено, что повышение температуры с 1300 до 2200 °С способствует снижению степени восстановления хрома с 98,9 до 69,8 %.

**Ключевые слова:** термодинамическое моделирование, хромовый рудно-известковый расплав, силикотермия, температура, степень восстановления элементов.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-993-994

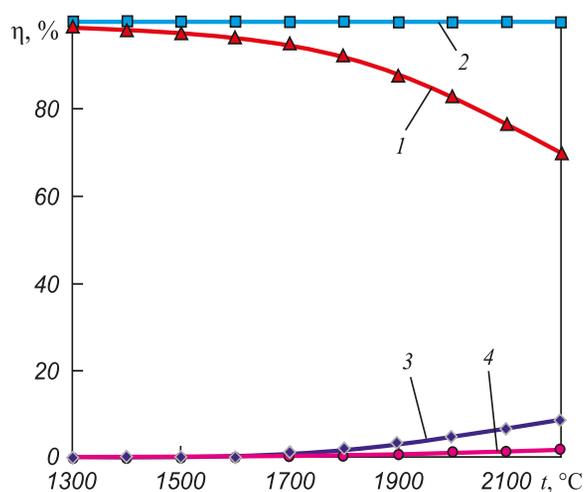
Хром- и никельсодержащие ферросплавы широко используются при выплавке специальных легированных сталей и сплавов, в частности, для производства нержавеющей марок сталей [1, 2]. Целью настоящей работы является изучение возможности применения кремния ферросиликоникеля в качестве восстановителя элементов хромового рудно-известкового расплава, а также оценка влияния температуры на степень восстановления металлов методом термодинамического моделирования. Ранее в работе [3] определены рациональные значения основности шлака и количества восстановителя. На основе полученных данных для исследований выбран следующий химический состав рудно-известкового расплава, % (по массе): 24 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 13 FeO; 42 CaO; 3 SiO<sub>2</sub>; 9 MgO; 9 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В качестве восстановителя использовали ферросплав, содержащий, % (по массе): 65 Si; 28 Fe; 7 Ni.

Для моделирования применяли программный комплекс HSC Chemistry 6.12, разработанный Outokumpu Research Oy (Финляндия) [4]. Расчеты выполняли в интервале температур 1300–2200 °С при ранее определенном рациональном расходе восстановителя 1,05  $m_{\text{восст}}$  (где  $m_{\text{восст}}$  – количество восстановителя, стехиометрически необходимого для полного восстановления хрома и железа) и давления газовой фазы 1 атм.

На рисунке представлена зависимость изменения степени восстановления элементов от температуры. Установлено, что повышение температуры процесса способствует снижению степени восстановления хрома на 29,4 % (с 98,9 до 69,8 %). Рассматриваемую зависимость можно объяснить тем, что реакция восста-

новления хрома кремнием экзотермическая и протекает с выделением тепла [5]. Необходимо отметить, что наиболее значимое (на 26,6 %) уменьшение степени восстановления хрома наблюдается в высокотемпературной (1700–2200 °С) области. Степень восстановления железа не изменяется во всем интервале температур и составляет 100 %, а алюминия и магния повышается с 0,2 до 8,7 % и с 0,007 до 2,5 % соответственно.

**Выводы.** Результаты термодинамического моделирования могут быть использованы для лабораторных



Изменение степени восстановления элементов ( $\eta$ ) в зависимости от температуры ( $t$ ) при расходе восстановителя 1,05  $m_{\text{восст}}$ :  
1 – Cr; 2 – Fe; 3 – Al; 4 – Mg

Change in the degree of recovery of elements ( $\eta$ ) as a function of temperature ( $t$ ) at a reducing agent consumption 1,05  $m_{\text{reducing agent}}$ :  
1 – Cr; 2 – Fe; 3 – Al; 4 – Mg

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (Проект № 16-03-00092).

экспериментов и технологических расчетов процесса силикотермического восстановления элементов из хромосодержащих оксидных расплавов с получением различных ферросплавов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гасик М.И., Лякишев Н.П., Емлин Б.И. Теория и технология производства ферросплавов. – М.: Metallurgiya, 1988. – 784 с.
2. Рысс М.А. Производство ферросплавов. – М.: Metallurgiya, 1985. – 344 с.
3. Салина В.А., Заякин О.В., Жучков В.И. Изучение силикотермического способа получения комплексных никель-, хромосодержащих ферросплавов методом термодинамического моделирования // Наука и техника Казахстана. 2017. № 3-4. С. 85 – 90.
4. Roine A. Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical reactions and Equilibrium software with extensive thermochemical database. – Pori: Outokumpu research OY, 2002.
5. Гасик М.И., Лякишев Н.П. Физикохимия и технология электроферросплавов. – Днепропетровск: Системные технологии, 2005. – 448 с.

Поступила 16 апреля 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. Vol. 61. No. 12, pp. 993–994.

### INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE ELEMENTS REDUCTION FROM CHROMIUM-CONTAINING ORE-LIME MELT

*O.V. Zayakin, V.A. Salina, V.I. Zhuchkov*

Institute of Metallurgy UB RAS, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** Results of thermodynamic modeling of the elements reduction from the chromium containing ore-lime melt with the use of silicon from ferrosiliconnickel as a reducing agent are presented as a function of temperature. It has been established that an increase in temperature from 1300 to 2200 °C helps to reduce the reduction degree of chromium from 98,9 to 69,8 %.

**Keywords:** thermodynamic modeling, chrome containing ore-lime melt, silicothermy, temperature, degree of elements reduction.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-993-994

#### REFERENCES

1. Gasik M.I., Lyakishev N.P., Emlin B.I. *Teoriya i tekhnologiya proizvodstva ferrosplavov* [Theory and technology of ferroalloys production]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 784 p. (In Russ.).
2. Ryss M.A. *Proizvodstvo ferrosplavov* [Production of ferroalloys]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 344 p. (In Russ.).
3. Salina V.A., Zayakin O.V., Zhuchkov V.I. Thermodynamic modeling of the silicothermic method for the production of complex nickel-chromium ferroalloys. *Nauka i tekhnika Kazakhstana*. 2017, no. 3-4, pp. 85–90. (In Russ.).
4. Roine A. *Outokumpu HSC Chemistry for Windows. Chemical reactions and Equilibrium software with extensive thermochemical database*. Pori: Outokumpu research OY, 2002.
5. Gasik M.I., Lyakishev N.P. *Fizikokhimiya i tekhnologiya elektroferrosplavov* [Physicochemistry and technology of electroferroalloys]. Dnepropetrovsk: Sistemnye tekhnologii, 2005, 448 p. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was financially supported by the RFBR (Project no. 16-03-00092).

#### Information about the authors:

*O.V. Zayakin, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher* (zferro@mail.ru)  
*V.A. Salina, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher*  
 (valentina\_salina@mail.ru)  
*V.I. Zhuchkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher*  
 (ntm2000@mail.ru)

Received April 16, 2018

УДК 621.735.042

## ОЦЕНКА ДЕФОРМИРУЕМОСТИ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ КОВКЕ

**Орлов Г.А.**, д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов  
давлением» (gor1@mail.ru)

**Шестакова Е.Н.**, аспирант кафедры «Обработка металлов  
давлением» (shestakova001@mail.ru)

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

**Аннотация.** Предложена высокоуглеродистая заэвтектоидная сталь для производства кованных валков горячей прокатки. Сталь содержит 1,2 – 1,4 % углерода, карбидообразующие легирующие элементы (хром, молибден, ванадий и ниобий) для повышения износостойкости валков, а также никель для повышения прокаливаемости. Установлено, что сталь предлагаемого состава обладает пластичностью, достаточной для проведения горячей деформации (ковки) с небольшими единичными обжатиями. Установлен температурный интервал деформации слитков: температура конца деформации должна быть не ниже 900 °С, температура нагрева под ковку – 1150 °С. По комплексу свойств сталь рекомендуется для изготовления цельнокованных валков и бандажей для составных валков горячей прокатки из слитков массой до 10 т.

**Ключевые слова:** высокоуглеродистая сталь, кованные валки, горячая прокатка, увеличение твердости, механические свойства, бандаж, составные валки.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-12-995-996

Одно из направлений повышения износостойкости и прочности кованных валков горячей прокатки заключается в применении высокоуглеродистых сталей [1, 2]. Авторами настоящей работы запатентована сталь [3], которая содержит, % (по массе): 1,2 – 1,4 С; 0,2 – 0,5 Si; 0,5 – 0,8 Mn; 1,4 – 1,7 Cr; 0,6 – 0,9 Ni; 0,1 – 0,3 Mo, а суммарное среднее содержание ванадия и ниобия определяется соотношением

$$V + Nb = \frac{C}{12},$$

где V, Nb и C – среднее содержание ванадия, ниобия и углерода соответственно, %.

При этом среднее содержание ванадия должно быть в 2,0 – 2,5 раза больше, чем ниобия.

Для оценки деформируемости стали предлагаемого состава проведено моделированиековки бандажей. За основу было взято решение В.Л. Колмогорова [4] по определению деформированного состояния при плоской протяжке, которое оценивается компонентами тензора скоростей деформации сдвига

$$\xi_{xx} = \left( 1,36 - \frac{0,62y^2}{h^2} - \frac{0,74y^4}{h^4} \right) \frac{v_0}{h};$$

$$\xi_{xy} = - \left( 0,62 + \frac{1,46y^2}{h^2} \right) \frac{v_0 xy}{bh^2}$$

и интенсивностью скоростей деформаций сдвига

$$H = 2\sqrt{\xi_{xx}^2 + \xi_{xy}^2},$$

где  $v_0$  – скорость обжатия;  $h, b$  – размеры поперечного сечения поковки.

Зная значение  $H$ , можно вычислить степень использования ресурса пластичности в формулировке В.Л. Колмогорова [4]:

$$\Psi = \frac{\int H dt}{\Lambda_p},$$

где  $\int H dt$  – накопленная степень деформации сдвига в данном месте поперечного сечения;  $\Lambda_p$  – пластичность стали.

Пластичность стали была исследована ранее [5]; по результатам исследования приняли, что предельная степень деформации сдвига в рассматриваемом случае  $\Lambda_p = 1,5$ . Сталь предлагаемого состава обладает пониженной пластичностью, поэтому рекомендуются режимыковки с пониженными величинами подачи и обжатий.

Моделируя процесс раскатки протяжкой полосы квадратного сечения ( $h = b$ , высота полосы  $2h = 0,3$  м) при величине обжатия 50 мм (числитель) и 100 мм (знаменатель), скоростиковки  $v_0 = 0,3$  м/с и температурековки 1000 °С, получили распределение  $\Psi$  по поперечному сечению (см. таблицу).

Таким образом, наибольшая вероятность образования трещин наблюдается в углах поковки ( $\Psi = 0,92$ ) при

**Распределение Ψ по поперечному сечению поковки**

**Distribution of Ψ in cross section of the forging**

y/b	Относительная координата x/b				
	0	0,25	0,50	0,75	1,00
1,00	0/0	0,11/0,22	0,15/0,30	0,35/0,70	0,46/0,92
0,75	0,17/0,34	0,18/0,36	0,14/0,28	0,25/0,50	0,29/0,58
0,50	0,26/0,52	0,26/0,52	0,18/0,36	0,27/0,54	0,28/0,56
0,25	0,19/0,38	0,19/0,38	0,19/0,38	0,29/0,58	0,29/0,58
0	0,30/0,60	0,30/0,60	0,30/0,60	0,30/0,60	0,30/0,60

обжатию 100 мм (30 % по высоте), поэтому особое внимание следует уделять равномерности нагрева поковки перед очередным выносом, а также ограничивать обжатие по высоте: не более 10 – 15 %. По результатам проведенных исследований разработаны режимы нагрева под ковку слитков массой 5,5 – 10,0 т, технологияковки рабочих валков и бандажей для составных валков, а также режимы первичной термической обработки поковок и окончательной термической обработки валков и бандажей на твердость 285 – 350 НВ.

**Выводы.** Наибольшая вероятность образования трещин наблюдается в углах поковки (Ψ = 0,92) при обжатию 100 мм (30 % по высоте), поэтому особое внимание следует уделять равномерности нагрева поковки перед очередным выносом, а также ограничивать обжатие по высоте: не более 10 – 15 %.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. А.с. 388052 СССР. Сталь для валков / С.В. Маркин, В.И. Погоржельский, И.Н. Калошин, Н.С. Валенко, И.З. Цилевич, Ю.А. Шапиро; заявл. 13.10.1971; опубл. 22.06.1973. Бюл. № 28.
2. А.с. 1076485 СССР. Сталь / Б.А. Мигачев, В.И. Бочкарев, П.В. Склюев, В.В. Кубачек, В.Н. Захаров, Г.Д. Фейгин; заявл. 08.12.1982; опубл. 28.02.1984. Бюл. № 8.
3. Пат. 2540241 RU. Сталь для изготовления кованных прокатных валков / А.И. Потапов, Г.А. Орлов, Е.Н. Шестакова, А.Г. Орлов; заявл. 31.10.2013; опубл. 10.02.2015. Бюл. № 4.
4. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
5. Потапов А.И., Шестакова Е.Н., Орлов Г.А., Беликов С.В. Применение сталей заэвтектоидных марок дляковки валков горячей прокатки // Черные металлы. 2015. № 2. С. 33 – 37.

Поступила 6 февраля 2018 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. Vol. 61. No. 12, pp. 995–996.

**ESTIMATION OF DEFORMABILITY OF HIGH-CARBON STEEL UNDER FORGING**

**G.A. Orlov, E.N. Shestakova**

**Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin, Russia, Ekaterinburg**

**Abstract.** The article presents high-carbon hypereutectoid steel for production of hot rolling forged rolls. The steel contains 1.2 – 1.4 % of carbon, carbide forming alloying elements Cr, Mo, V and Nb improving wear resistance of the rolls, and Ni increasing hardening capacity. It has been found that steel of proposed composition provides ductility sufficient for hot deformation (forging) by moderate single compressions. Temperature range of ingot deformation has been detected: finite temperature deformation should not be below 900 °C, forging temperature – 1150 °C. According to its properties steel can be recommended for manufacturing solid-forged rolls and bandages for composite rolls of hot rolling from ingots of up to 10 tons weight.

**Keywords:** high-carbon hypereutectoid steel, forged rolls, hot rolling, increased hardness, mechanical properties, bandage, compound rolls.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-12-995-996

**REFERENCES**

1. Markin S.V., Pogorzhel'skii V.I., Kaloshin I.N., Valenko N.S., Tsel'evich I.Z., Shapiro Yu.A. *Stal' dlya valkov* [Steel for rolls]. Cer-

tificate of authorship USSR no. 388052. *Bulleten' izobretenii*. 1973, no. 28. (In Russ.).

2. Migachev B.A., Bochkarev V.I., Sklyuev P.V., Kubachek V.V., Zakharov V.N., Feigin G.D. *Stal'* [Steel]. Certificate of authorship USSR no. 1076485. *Bulleten' izobretenii*. 1984, no. 8. (In Russ.).
3. Potapov A.I., Orlov G.A., Shestakova E.N., Orlov A.G. *Stal' dlya izgotovleniya kovanykh prokatnykh valkov* [High-carbon steel for production of hot rolling forged rolls]. Patent RF no 2540241. *Bulleten' izobretenii*. 2015, no. 4. (In Russ.).
4. Kolmogorov V.L. *Mekhanika obrabotki metallov davleniem* [Mechanics of metal forming]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 688 p. (In Russ.).
5. Potapov A.I., Shestakova E.N., Orlov G.A., Belikov S.V. Application hypereutectoid steel grades for forging of hot rolling rolls. *Chernye Metally*. 2015, no. 2, pp. 33–37. (In Russ.).

**Information about the authors:**

**G.A. Orlov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metal Forming"**  
(gorl@mail.ru)

**E.N. Shestakova, Postgraduate of the Chair "Metal Forming"**  
(shestakova01@mail.ru)

Received February 6, 2018

## Указатель статей, помещенных в журнале «Известия высших учебных заведений. Черная металлургия» за 2018 год

<b>Байсанов С.О.</b> 60 лет научной и инновационной деятельности Химико-металлургического института им. Ж. Абишева .....	9
<b>Жарменов А.А.</b> Сила – в комплексности: Национальному центру по комплексной переработке минерального сырья Республики Казахстан – 25! .....	9
<b>Филонов М.Р.</b> Итоги научной деятельности НИТУ «МИСиС» в 2017 году .....	7
<b>Филонов М.Р.</b> Создатели будущего .....	11
<b>МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ</b>	
<b>Афанасьев А.В., Мельников А.А., Васьюк М.И., Бельков Д.Н.</b> Циклические испытания стресс-коррозионных трещин стальных газопроводных труб при отсутствии коррозионной среды .....	8
<b>Бабенко А.А., Жучков В.И., Уполовникова А.Г., Рябов В.В.</b> Применение метода симплексных решеток для построения диаграмм состав – вязкость шлаков системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{V}_2\text{O}_5$ , содержащих 15 % $\text{Al}_2\text{O}_3$ и 8 % $\text{MgO}$ .....	8
<b>Байсанов С.О., Байсанов А.С., Исагулов А.З., Есенгалиев Д.А., Оспанов Н.И.</b> Разработка технологии выплавки рафинированного ферромарганца с применением специальных комплексных восстановителей .....	9
<b>Бардовский А.Д., Герасимова А.А., Керопян А.М., Бибииков П.Я.</b> Влияние механических характеристик материала струнных сит на процесс грохочения .....	9
<b>Белоносов А.В., Чикова О.А., Зайцева Н.А.</b> Изучение структуры металла прокатных валков с лазерной наплавкой с целью контроля их качества .....	7
<b>Боташев А.Ю., Малсугенов Р.С., Бисилев Н.У.</b> Разработка метода газовой формовки с противодавлением и создание оборудования для его осуществления .....	1
<b>Будников А.С., Романцев Б.А., Харитонов Е.А.</b> Определение диаметра валков станов винтовой прокатки .....	9
<b>Быстров В.А.</b> Эффективность упрочнения твердым сплавом сменных деталей металлургических агрегатов .....	12
<b>Гусев А.И., Усольцев А.А., Козырев Н.А., Кибко Н.В., Башенко Л.П.</b> Разработка порошковой проволоки для наплавки деталей, работающих в условиях износа .....	11
<b>Дмитриенко А.В., Протопопов Е.В., Дмитриенко В.И., Якушевич Н.Ф., Горюшкин В.Ф.</b> Изучение процесса прямого легирования стали марганцем в условиях современного электросталеплавильного производства .....	12
<b>Еронец С.П., Золотухин В.И., Ткачев М.Ю., Провоторов Д.А., Ошовская Е.В.</b> Модельные исследования изменения гидродинамики потоков стали в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ во время замены погружных стаканов .....	7
<b>Загайнов С.А., Филатов С.В., Мясоедов С.В., Гилева Л.Ю., Титов В.Н.</b> Преимущества и риски работы доменных печей с высокой интенсивностью .....	10
<b>Зайдес С.А., Нгуен Ван Хуан.</b> Влияние параметров процесса калибровки на изгибную жесткость стальных прутков. Часть 2 .....	3
<b>Зиятдинов М.Х., Шатохин И.М., Леонтьев Л.И.</b> Технология СВС композиционных ферросплавов. Часть 1. Металлургический СВС процесс. Синтез нитридов феррованадия и феррохрома .....	5
<b>Зиятдинов М.Х., Шатохин И.М., Леонтьев Л.И.</b> Технология СВС композиционных ферросплавов. Часть 2. Синтез нитрида ферросилиция и бориды ферротитана .....	7
<b>Зиновеев Д.В., Грудинский П.И., Дюбанов В.Г., Коваленко Л.В., Леонтьев Л.И.</b> Обзор мировой практики переработки красных шламов. Часть 1. Пирометаллургические способы .....	11
<b>Иванов Д.И., Кожухов А.А., Складар В.А.</b> Анализ причин снижения эксплуатационного ресурса колосников обжиговых тележек из стали 40X24H12Cl методом математического моделирования .....	7
<b>Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А., Прохоренко О.Д., Айматов В.Г.</b> Изучение качества сварного шва, полученного при сварке под флюсом с использованием барийстронциевого карбоната .....	2
<b>Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Уманский А.А., Михно А.Р., Думова Л.В.</b> Исследование и разработка сварочных флюсов с использованием ковшевого электросталеплавильного шлака и барий-стронциевого модификатора для наплавки прокатных валков .....	4
<b>Койнов Т., Бельский С.М., Мухин Ю.А., Чупров В.Б.</b> Влияние усилий изгиба рабочих валков на уширение тонкой стальной полосы при горячей прокатке .....	5
<b>Крутецкий Ю.Л., Тюрин А.Г., Попов М.В., Максимовский Е.А., Нецкина О.В.</b> Синтез высокодисперсного карбида ванадия ( $\text{VC}_{0,88}$ ) с использованием нановолокнистого углерода .....	4
<b>Крюков Р.Е., Козырев Н.А., Башенко Л.П., Козырева О.Е., Михно А.Р.</b> Использование барий-стронциевого карбоната при изготовлении сварочных флюсов на основе шлака производства силикомарганца .....	8
<b>Крючков О.Б.</b> Использование физического моделирования для определения температурного поля в заготовке .....	1
<b>Левицкий И.А., Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Сидорова Т.Ю.</b> Влияние способа подачи природного газа на газодинамику и теплообмен в воздушной форме доменной печи .....	5
<b>Левков Л.Я., Шурыгин Д.А., Дуб В.С., Ключай В.В., Корзун Е.Л.</b> Исследование степени окисления хрома в оксидно-фторидных шлаках, применяемых при электрошлаковом переплаве .....	12
<b>Леушина Л.И., Леушин И.О., Плехов С.В., Деев В.Б.</b> О перспективах рециклинга боя кварцевых керамических оболочек литья по выплавляемым моделям .....	11
<b>Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М.</b> Нагруженность и напряженное состояние бойков установки непрерывного литья и деформации полосы при получении листов из стали для сварных труб. Сообщение 1 .....	4
<b>Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М.</b> Нагруженность и напряженное состояние бойков установки непрерывного литья и деформации полосы при получении листов из стали для сварных труб. Сообщение 2 .....	6
<b>Михайленко А.М., Шварц Д.Л.</b> Концепция оптимальной калибровки сортопрокатных валков. Сообщение 1. Основные положения .....	1
<b>Михайленко А.М., Шварц Д.Л.</b> Концепция оптимальной калибровки сортопрокатных валков. Сообщение 2. Пространство калибров .....	5
<b>Мухамбетгалеев Е.К., Есенжулов А.Б., Рошин В.Е.</b> Получение комплексного сплава из высококремнистой марганцевой руды и высокозольных углей Казахстана .....	9
<b>Мухтар А.А., Мухымбекова М.К., Макашев А.С., Савин В.Н.</b> Термоманнитное обогащение и дефосфорация бурожелезняковых руд и концентратов .....	9
<b>Нгуен В.М., Конохов Ю.В., Рыжонков Д.И.</b> Исследование влияния электромагнитного поля и энергомеханической обработки на процесс получения наноразмерных порошков металлического кобальта с восстановлением водородом .....	2
<b>Одинокое В.И., Дмитриев Э.А., Евстигнеев А.И.</b> Математическое моделирование процесса течения металла в кристаллизаторе при его подаче из погружного стакана с эксцентричными отверстиями .....	8
<b>Орыщенко А.С., Малышевский В.А., Петров С.Н., Шумилов Е.А.</b> Взаимосвязь уровня легирования, структуры и механических свойств высокопрочных сталей .....	3
<b>Осипова Н.В.</b> Использование фильтра Калмана при автоматическом контроле показателей магнитного обогащения железных руд .....	5
<b>Павловец В.М., Герасимук А.В.</b> Особенности движения зародыша сложной формы на тарельчатом окомкователе в производстве железорудных окатышей .....	2
<b>Рубцов В.Ю., Шевченко О.И., Миронова М.В.</b> Совершенствование динамического режима прокатки для повышения стойкости валков шаропркатного стана .....	12
<b>Самусев С.В., Алещенко А.С., Фадеев В.А.</b> Моделирование процесса непрерывной формовки сварных прямошовных труб на базе «ТРЕНАЖЕРА – ТЭСА 10-50» .....	5

<b>Семькин С.И., Голуб Т.С., Семькина Е.В., Дудченко С.А., Вакульчук В.В.</b> Изучение на физической модели кислородного конвертера характера потерь жидкости с брызгами в варианте применения низковольтовых потенциалов .....	10
<b>Сибгатуллин С.К., Харченко А.С., Девятченко Л.Д.</b> Оценка неравномерности распределения шихтовых материалов в доменной печи .....	10
<b>Снитко С.А., Яковченко А.В., Сотников А.Л.</b> Влияние схем штамповки колесных заготовок на силовые режимы работы формовочного прессы и износ инструмента деформации .....	5
<b>Стулов В.В.</b> О моделировании процессов в кристаллизаторе машины непрерывной разливки стали .....	2
<b>Уманский А.А., Думова Л.В.</b> Исследование комплексного влияния параметров выплавки рельсовой электростали на качество рельсовой продукции и технико-экономические показатели ее производства .....	11
<b>Федосов А.В., Чумаченко Г.В., Ходарев М.А., Голомеев В.В.</b> Оценка эффективности применения закрытых прибылей различной геометрии на основе результатов математического моделирования .....	7
<b>Филиппов А.А., Пачурин Г.В., Кузьмин Н.А., Матвеев Ю.И., Деев В.Б.</b> Оценка качества стального проката для холодной объемной штамповки .....	7
<b>Шабанов Е.Ж., Избембетов Д.Д., Байсанов С.О., Шадиев М.Ф.</b> Технология производства высокоуглеродистого феррохрома с использованием моношихтовых брикетов .....	9
<b>Шилов В.А., Непряхин С.О., Шварц Д.Л.</b> Статистический анализ и расчет формоизменения металла при прокатке двутавровых профилей на универсальных рельсобалочных станах .....	3
<b>Шинкин В.Н.</b> Упругопластический изгиб круглого стального бруса. Сообщение 1. Коэффициент пружинения .....	3
<b>Шинкин В.Н.</b> Упругопластический изгиб круглого стального бруса. Сообщение 2. Остаточные напряжения .....	11
<b>Ширяев А.Г., Четвериков С.Г., Чикалов С.Г., Пышминцев И.Ю., Крылов П.В.</b> Технологии производства стальных бесшовных труб для добычи трудноизвлекаемых углеводородов .....	11
<b>Ярошенко Ю.Г., Липунов Ю.И., Смаханов А.Б., Столярова М.В.</b> Применение технологии водо-воздушного охлаждения для термической обработки подшипниковых колец .....	6
<b>Ячиков И.М., Портнова И.В., Ларина Т.П.</b> Исследование на физической модели поведения токнесущей жидкости в ванне дуговой печи постоянного тока под действием внешнего вертикального магнитного поля .....	1

#### РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

<b>Подгородецкий Г.С., Горбунов В.Б., Агапов Е.А., Ерохов Т.В., Козлова О.Н.</b> Проблемы и перспективы утилизации золошлаковых отходов ТЭЦ. Часть 1 .....	6
--	---

#### ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

<b>Беланов И.П., Наумова Н.Б., Семина И.С., Савенков О.А.</b> Шлаки металлургического производства – перспективный материал для рекультивации техногенных отходов .....	12
<b>Кудряшова И.А., Харлампенков Е.И., Захарова Н.В.</b> Эколого-экономические аспекты производства винилхлорида на основе использования сырьевых ресурсов коксохимического предприятия .....	11
<b>Орлов А.С., Исагулов А.З., Сариев О.Р., Толымбеков М.Ж.</b> Разработка технологии выплавки комплексного алюминий-хром-кремнийсодержащего сплава АХС из некондиционного сырья .....	9
<b>Подгородецкий Г.С., Горбунов В.Б., Агапов Е.А., Ерохов Т.В., Козлова О.Н.</b> Проблемы и перспективы утилизации золошлаковых отходов ТЭЦ. Часть 2 .....	7
<b>Потоцкий Е.П., Фирсова В.М., Сахарова Е.А.</b> Учет сочетанного действия комплекса вредных факторов и анализ влияния производственного фактора химической природы на уровень профессионального риска .....	1

<b>Симонян Л.М.</b> Анализ методологии определения выбросов CO <sub>2</sub> на территории РФ применительно к черной металлургии .....	9
<b>Шорохова А.В., Новичихин А.В., Юрьева Е.Н.</b> Социально ориентированная информационная технология повышения уровня экологической безопасности горно-металлургического района .....	10

#### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<b>Аксёнова К.В., Никитина Е.Н., Иванов Ю.Ф., Косинов Д.А.</b> Механизмы упрочнения сталей с бейнитной и мартенситной структурами при деформации сжатием .....	10
<b>Алеутдинова М.И., Фадин В.В., Алеутдинов К.А.</b> Износ спеченных композитов на основе подшипниковой стали при граничном трении с токосъемом по меди .....	10
<b>Алюшин Ю.А., Горбатюк С.М.</b> Возможные механизмы диссипации энергии при переходе от обратимой деформации к необратимой .....	3
<b>Бабенко А.А., Жучков В.И., Сельменских Н.И., Уполовникова А.Г.</b> Структура и свойства низкоуглеродистой трубной стали 17Г1С-У, микролегированной бором .....	10
<b>Баженов В.Е., Пикунов М.В.</b> Микроликвация кремния в чугунах .....	3
<b>Бахматов П.В., Муравьев В.И., Фролов А.В., Пицык В.С.</b> Особенности изменения структуры и свойств твердофазного соединения сплава ОТ4-1, полученного холодной тугой посадкой и последующей термической обработкой .....	12
<b>Боровых М.А., Чикова О.А., Цепелев В.С., Выхин В.В.</b> О влиянии режима термообработки на удельное электросопротивление расплава стали 35ХГФ .....	3
<b>Бровер А.В., Бровер Г.И.</b> Влияние постоянного магнитного поля на структурообразование в сталях при скоростной лазерной обработке .....	8
<b>Данилов В.И., Смирнов А.Н., Горбатенко В.В., Орлова Д.В., Данилова Л.В.</b> Деформация Людера в сварных соединениях .....	2
<b>Громов В.Е., Кормышев В.Е., Глезер А.М., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф.</b> Градиентная структура слоя, наплавленного на сталь HARDOX 450 порошковой проволокой системы Fe-C-Cr-Nb-W и модифицированного электронно-пучковой обработкой .....	4
<b>Громов В.Е., Юрьев А.А., Иванов Ю.Ф., Гришунин В.А., Коновалов С.В.</b> Перераспределение атомов углерода в дифференцированно закаленных рельсах при длительной эксплуатации .....	6
<b>Гусев А.И., Усольцев А.А., Козырев Н.А., Кибко Н.В., Башенко Л.П.</b> Разработка порошковой проволоки для наплавки деталей, работающих в условиях износа .....	11
<b>Иванов Ю.Ф., Юрьев А.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Перегудов О.А.</b> Преобразование карбидной фазы рельсов при длительной эксплуатации .....	2
<b>Исаев Г.А., Магидсон И.А., Смирнов Н.А.</b> Структура ансамбля ионов и их подвижность в некоторых шлаках для рафинирования стали в агрегате ковш-печь .....	1
<b>Кудрявцев А.С., Охупкин К.А.</b> Влияние длительного теплового старения в составе теплообменного оборудования реакторной установки на быстрых нейтронах на структуру и свойства аустенитной хромоникелевой стали .....	11
<b>Кузнецов П.А., Климов В.Н., Кириленко Д.А., Яговкина М.А., Самоделькин Е.А.</b> Особенности строения ленты нанокристаллического сплава Fe-Cu-Nb-Si-B, полученной методом спиннингования расплава .....	5
<b>Мыльников В.В., Скуднов В.А.</b> Влияние различных параметров состояния на закономерности поведения кривых усталости .....	3
<b>Нечайкина Т.А., Никулин С.А., Рогачев С.О., Турилина В.Ю., Баранова А.П.</b> Сопротивление разрушению переходной зоны трехслойного материала сталь – ванадиевый сплав – сталь после деформационно-термической обработки .....	6
<b>Никоенко Е.Л., Попова Н.А., Сизоненко Н.Р., Демент Т.В., Колева Н.А.</b> Изменение структуры жаропрочного сплава, легированного рением и лантаном, в зависимости от термообработки .....	4
<b>Полетаев Г.М., Зоря И.В., Ракитин Р.Ю.</b> Исследование взаимодействия примеси водорода с нанокристаллическими палладием и никелем .....	8

Полетаев Г.М., Зоря И.В., Ракитин Р.Ю., Коханенко Д.В., Старостенков М.Д. Влияние деформации на скорость миграции границ наклона в никеле .....	12
Романов Д.А., Протопопов Е.В. Модель электроэрозионного разрушения композиционных электровзрывных покрытий в условиях искровой эрозии .....	2
Смирнов Е.Н., Скляр В.А., Смирнов О.Е., Белевитин В.А., Пивоваров Р.Е. Исследование поведения дефектов макроструктуры предварительно деформированной в линии МНЛЗ непрерывной сортовой заготовки при прокатке .....	5
Степанов М.С., Домбровский Ю.М., Давидян Л.В. Оценка механических свойств и природа упрочнения диффузионного слоя при микродуговом ванадировании стали .....	8
Чуманов И.В., Анисеев А.Н. Пропитка подложек из монокарбида вольфрама низкоуглеродистой сталью контактными и бесконтактными методами .....	5
Чукин М.В., Кошчева Н.В., Ефимова Ю.Ю., Чукин Д.М., Никитенко О.А. Исследование влияния скорости движения заготовки из высокоуглеродистой стали в агрегате патентирования на формирование структуры и механических свойств .....	4
Чукин М.В., Полякова М.А., Пивоварова К.Г., Ефимова Ю.Ю., Гулин А.Е. Исследование структуры и некоторых свойств проволоки из углеродистой стали марки 50 при волочении .....	7
Шляхова Г.В., Баранникова С.А., Бочкарёва А.В., Ли Ю.В., Зуев Л.Б. Исследование структуры биметалла конструкционная углеродистая сталь – нержавеющая сталь .....	4

**ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ**

Никитин А.Г., Абрамов А.В., Горяшин В.В. Математическая модель диагностирования перебега зазора в шарнире кривошип-шатун кривошипно-коромыслового механизма щековой дробилки .....	6
Ляшенко В.И., Дятчин В.З., Франчук В.П. Совершенствование вибрационных питателей-грохотов для горно-металлургической промышленности .....	6
Савельев А.Н., Козлов С.В., Винокуров Н.Е. Динамические нагрузки, воздействующие на элементы многодвигательного гидропривода холодильника МНЛЗ .....	2
Сахаров Д.Ф., Витушкин А.В. Силовой анализ процесса дробления в конусной дробильной машине .....	12

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Акбердин А.А., Коңуров У.К., Султангазиев Р.Б. Марганцовистая емкость и оптическая основность металлургических шлаков .....	1
Александров А.А., Дашевский В.Я., Леонтьев Л.И. Растворимость кислорода в расплавах системы Fe – Co, содержащих углерод .....	1
Александров А.А., Дашевский В.Я., Леонтьев Л.И. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe – Ni, содержащих бор .....	3
Бендре Ю.В., Горюшкин В.Ф., Крюков Р.Е., Козырев Н.А., Башенко Л.П. Термодинамическая оценка процессов восстановления WO <sub>3</sub> углеродом и кремнием .....	3
Бут Е.А., Павлов А.В. Изучение твердожидкофазного карботермического восстановления никеля из рудоугольных брикетов .....	2
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 1. Восстановитель – смесь CO–CO <sub>2</sub> .....	9
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 <sub>2</sub> – H <sub>2</sub> O .....	10

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 3. Восстановитель – конвертированный газ .....	12
Крутский Ю.Л., Дюкова К.Д., Кузьмин Р.И., Нецкина О.В., Иорх А.Е. Синтез высокодисперсного диборида хрома с использованием нановолокнистого углерода .....	10
Михайлов Г.Г., Макровец Л.А., Смирнов Л.А. Термодинамика процессов взаимодействия компонентов жидкого металла в системе Fe–Mg–Al–La–O .....	6
Михайлович С.В., Шекшеев М.А., Платов С.И., Емелюшин А.Н., Наумов С.В. Исследование вязкости жидких сварочных шлаков и расплавов электродных покрытий .....	4
Пустовойт В.Н., Долгачев Ю.В., Домбровский Ю.М., Корнилов Ю.А. О местах сдвигового образования зародышей при фазовых превращениях в стали .....	2
Мухамбетгалиев Е.К., Рошин В.Е., Байсанов С.О. Аналитические выражения металлической системы Fe–Si–Al–Mn и фазовый состав алюмосиликомарганца .....	7
Хисамутдинов Н.Е., Явойская О.В., Явойский А.В., Хисамутдинов С.Н. Особенности поверхностных явлений в сталеплавильной ванне кислородного конвертера .....	3
Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г., Спирин Н.А., Лавров В.В. Физико-химические аспекты расчета процесса обжига рудоугольных окатышей на конвейерной машине .....	4
Шешуков О.Ю., Михеенков М.А., Вязникова Е.А., Быков А.С., Ведмидь Л.Б. Изменение фазового состава сидеритов Бакальского месторождения при нагреве .....	11

**НАУКА ПРОИЗВОДСТВУ**

Кузнецов В.А., Кузнецова Е.С., Громов В.Е., Косинов Д.А. Система автоматического управления процессом электростимулированного волочения .....	8
Никитин А.Г., Абрамов А.В., Баженов И.А. Расчет параметров упругого пневматического элемента, выполненного в виде цилиндра с ограниченной радиальной деформацией .....	8
Раханов С.Р. Вибрационная прошивка трубной заготовки на прошивном прессе трубопрессовой установки .....	2

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

Акбердин А.А., Ким А.С., Султангазиев Р.Б. Планирование численного и физического эксперимента при моделировании технологических процессов .....	9
Габелая Д.И., Кабаков З.К., Грибкова Ю.В. Моделирование формирования шлакового гарнисажа на стенке кристаллизатора МНЛЗ .....	1
Зимин В.В., Буркова И.В., Митьков В.В., Зимин А.В. Оптимизация объема пилотного тестирования ERP-системы .....	6
Зимин А.В., Буркова И.В., Митьков В.В., Зимин В.В. Формирование программ обучения пользователей ERP-системы .....	10
Зимин В.В., Митьков В.В., Зимин А.В. Календарное планирование ИТ-сервисов ERP-проекта предприятия .....	4
Киселева Т.В., Михайлов В.Г., Степанов И.Г. Управление эколого-экономической системой коксохимического предприятия .....	10
Ревун М.П., Зинченко В.Ю., Иванов В.И., Чепрасов А.И. К оптимизации управления тепловой работой термической печи камерного типа .....	8
Сарычев В.Д., Ханмзон Б.Б., Невский С.А., Ильяшенко А.В., Гришунин В.А. Математические модели механизмов ускоренного охлаждения проката .....	4
Сибгатуллин С.К., Харченко А.С., Девятченко Л.Д. Приложение марковских цепей к анализу эффективности работы доменной печи .....	8

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ**

Александров А.А., Дашевский В.Я. Растворимость кислорода в расплавах системы Fe–Co–Cr, содержащих ванадий .....	7
---	---

<b>Александров А.А., Дашевский В.Я.</b> Влияние титана на растворимость кислорода в расплавах системы Ni–Co–Cr .....	10	<b>Малышева Т.Я., Писарев С.А., Макавецкас А.Р., Фищенко Ю.Ю.</b> К вопросу об использовании в аглопроцессе железных руд Ковдорского месторождения .....	5
<b>Александров А.А., Дашевский В.Я., Леонтьев Л.И.</b> Термодинамика растворов кислорода в расплавах Fe–Co–Cr, содержащих кремний .....	8	<b>Никитин А.Г., Демина Е.И., Баженов И.А.</b> Экспериментальное исследование резки на ножницах предварительно изогнутой полосы проката .....	4
<b>Дашевский В.Я., Александров А.А.</b> Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Ni–Cr, содержащих алюминий .....	6	<b>Орлов Г.А., Котов В.В., Орлов А.Г.</b> Анализ изменения разности трубок под действием внутреннего давления .....	6
<b>Захаров Н.И., Тупилко И.В.</b> Приложение закона Сиверта к исследованию процессов тепломассопереноса при дегазации расплавов металлов от растворенного азота в электростатическом поле докритических напряженностей .....	11	<b>Орлов Г.А., Маланов А.А., Орлов А.Г.</b> Влияние технологических погрешностей на силовые параметры холодной прокатки труб .....	5
<b>Заякин О.В., Салина В.А., Жучков В.И.</b> Термодинамическая оценка влияния температуры на восстановление элементов из хромсодержащего рудно-известкового расплава .....	12	<b>Орлов Г.А., Шестакова Е.Н.</b> Оценка деформируемости высокоуглеродистой стали при ковке .....	12
<b>Каледин В.О., Тагильцев-Галета К.В., Ульянов А.Д.</b> Модель термомеханического поведения конструкций, усиленных волокнистым пластиком .....	10	<b>Тищук Л.И., Соломонов К.Н.</b> Влияние трения на формоизменение плоской заготовки .....	3
<b>Кулаков С.М., Мусатова А.И., Кадыков В.Н.</b> Нормативное моделирование производительности комплекса меднения стальной проволоки .....	2	<b>В ПОРЯДКЕ ДИСКУССИИ</b>	
<b>Кулаков С.М., Мусатова А.И., Кадыков В.Н.</b> Ситуационные модели производительности человеко-машинных систем (на примере волочильных станков) .....	6	<b>Кузнецов Ю.С., Качурина О.И.</b> Окислительно-восстановительные свойства газовых фаз .....	1
		<b>Малышев В.П., Макашева А.М.</b> О возможности описания динамической вязкости в зависимости от состава сплава и температуры по диаграммам состояния .....	9
		<b>К 90-летию Бориса Вадимовича Линчевского</b> .....	6

## Index of articles

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

<b>S.O. Baisanov</b> 60 years of scientific and innovative activity of Chemical-Metallurgical Institute named after Zh. Abishev .....	9	<b>O.S. Lekhov, A.V. Mikhalev, M.M. Shevelev</b> Load and strain status of CCM backups and stripe deformation at production of steel sheets for welded pipes. Report 1 .....	4
<b>M.R. Filonov</b> Creators of the future .....	11	<b>O.S. Lekhov, A.V. Mikhalev, M.M. Shevelev</b> Load and strain status of CCM backups and stripe deformation at production of steel sheets for welded pipes. Report 2 .....	6
<b>M.R. Filonov</b> Results of scientific research activity of the National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS) for 2017 .....	7	<b>L.I. Leushina, I.O. Leushin, S.V. Plokhov, V.B. Deev</b> Recycling of shards of quartz ceramic shells from investment casting .....	11
<b>A.A. Zharmenov</b> Strength – in complexity: To the 25th anniversary of Kazakhstan National Center of Mineral Raw Materials Complex Processing .....	9	<b>I.A. Levitskii, A.G. Radyuk, A.E. Titlyanov, T.Yu. Sidorova</b> Influence of the method of natural gas supplying on gas dynamics and heat transfer in air tuyere of blast furnace .....	5
<b>METALLURGICAL TECHNOLOGIES</b>			
<b>A.V. Afanas'ev, A.A. Mel'nikov, M.I. Vas'kov, D.N. Bel'kov</b> Cyclic tests of stress-corrosion cracks of steel gas pipeline pipes in the absence of corrosive environment .....	8	<b>L.Ya. Levkov, D.A. Shurygin, V.S. Dub, V.V. Klochai, E.L. Korzun</b> Study of the oxidation degree of chromium in oxide-fluoride slags for ESR .....	12
<b>A.A. Babenko, V.I. Zhuchkov, A.G. Upolovnikova, V.V. Ryabov</b> Application of simplex lattice method for composition-viscosity plotting of CaO–SiO <sub>2</sub> –B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> slags with 15 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> and 8 % MgO .....	8	<b>A.M. Mikhailenko, D.L. Shvarts</b> The concept of optimal bar roll design. Report 1. Basic provisions .....	1
<b>S.O. Baisanov, A.S. Baisanov, A.Z. Isagulov, D.A. Esengaliev, N.I. Ospanov</b> Development of smelting technology of refined ferromanganese with special complex reducing agents .....	9	<b>A.M. Mikhailenko, D.L. Shvarts</b> The concept of optimal bar roll design. Report 2. Calibers space .....	5
<b>A.D. Bardovskii, A.A. Gerasimova, A.M. Keropyan, P.Ya. Bibikov</b> Influence of the mechanical characteristics of harp screen material on screening process .....	9	<b>E.K. Mukhambetgaliev, A.B. Esenzbulov, V.E. Roshchin</b> Production of complex alloy from high-silicon manganese ore and high-ash coals of Kazakhstan .....	9
<b>A.V. Belonosov, O.A. Chikova, N.A. Zaitseva</b> Examining the structure of mill rolls metal with laser surfacing for their quality control .....	7	<b>A.A. Mukhtar, M.K. Mukhymbekova, A.S. Makashev, V.N. Savin</b> Thermomagnetic concentration and dephosphorizing of brown clay iron ore and concentrates .....	9
<b>A.Yu. Botashev, R.S. Malsugenov, N.U. Bisilov</b> Development of the method of gas molding with back pressure and creation of the equipment for its implementation .....	1	<b>V.M. Nguyen, Yu.V. Konyukhov, D.I. Ryzhonkov</b> Investigation of the influence of electromagnetic field and energy-mechanical processing on the production of metallic cobalt nanopowder by hydrogen reduction .....	2
<b>A.S. Budnikov, B.A. Romantsev, E.A. Kharitonov</b> Determination of rolls diameter for screw-rolling mills .....	9	<b>A.S. Oryshchenko, V.A. Malyshevskii, S.N. Petrov, E.A. Shumilov</b> Interrelations of alloying level, structure and mechanical properties of high-strength steels .....	3
<b>V.A. Bystrov</b> Efficiency of hardening of metallurgical equipment spare parts by hard alloy .....	12	<b>V.I. Odinokov, E.A. Dmitriev, A.I. Evstigneev</b> Mathematical modeling of metal flow in crystallizer at its supply from submersible nozzle with eccentric holes .....	8
<b>A.V. Dmitrienko, E.V. Protopopov, V.I. Dmitrienko, N.F. Yakushevich, V.F. Goryushkin</b> Direct steel alloying by manganese under recent conditions of electric steel-making .....	12	<b>N.V. Osipova</b> The use of Kalman filter in automatic control of indicators of iron ores magnetic concentration .....	5
<b>S.P. Eron'ko, V.I. Zolotukhin, M.Yu. Tkachev, D.A. Provotorov, E.V. Oshovskaya</b> Model studies of hydrodynamic changes of steel flows in mold of slab CCM during submerged nozzles replacement .....	7	<b>V.M. Pavlovets, A.V. Gerasimuk</b> Movement specifics of a germ with complex shape on the pelletizing disk in iron-ore pellets production .....	2
<b>A.V. Fedosov, G.V. Chumachenko, M.A. Khodarev, V.V. Golomeev</b> Assessment of the efficiency of using blind feeders of various geometry based on mathematical simulation results .....	7	<b>V.Yu. Rubtsov, O.I. Shevchenko, M.V. Mironova</b> Improving dynamic regime of rolling for increasing durability of ball-rolling mill rolls .....	12
<b>A.A. Filippov, G.V. Pachurin, NA. Kuz'min, Yu.I. Matveev, V.B. Deev</b> Evaluation of quality of rolled steel for cold volume forging .....	7	<b>S.V. Samusev, A.S. Aleshchenko, V.A. Fadeev</b> Simulation of the process of continuous forming of straight-seam welded pipes on the basis of “TESA 10-50 TRAINER” .....	5
<b>D.I. Ivanov, A.A. Kozhukhov, V.A. Sklyar</b> Mathematical modeling of operation of the pallet cars' grate bars made of steel 40Kh24N-12SL .....	7	<b>S.A. Snitko, A.V. Yakovchenko, A.L. Sotnikov</b> Influence of wheel billet stamping schemes on power modes of forming press operation and on wear of the deformation tool .....	5
<b>T. Koinov, S.M. Bel'skii, Yu.A. Mukhin, V.B. Chuprov</b> Influence of bending efforts of working rolls on widening of the thin steel strip during hot rolling .....	5	<b>V.A. Shilov, S.O. Nepryakhin, D.L. Shvarts</b> Statistical analysis and calculation of metal forming during rolling of H-beam profiles on the universal rail-beam mill .....	3
<b>N.A. Kozyrev, R.E. Kryukov, A.A. Umanskii, A.R. Mikhno, L.V. Dumova</b> Investigation and development of welding fluxes with the use of ladle electric-furnace slag and barium-strontium modifier for rolls surfacing .....	4	<b>S.I. Semykin, T.S. Golub, E.V. Semykina, S.A. Dudchenko, V.V. Vakul'chuk</b> Study of the interrelations of blowing parameters, options of electric influence and nature of liquid spraying by physical modeling .....	10
<b>N.A. Kozyrev, R.E. Kryukov, A.A. Usol'tsev, O.D. Prokhorenko, V.G. Aimatov</b> Study of the quality of weld seam obtained by welding with barium-strontium carbonate flux .....	2	<b>E.Zh. Shabanov, D.D. Izbembetov, S.O. Baisanov, M.F. Shadiey</b> Technology for the production of high-carbon ferrochromium using mono-briquettes .....	9
<b>O.B. Kryuchkov</b> The use of physical modeling to determine temperature field in the billet .....	1	<b>S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, L.D. Devyatchenko</b> Evaluation of uneven distribution of charge materials at blast furnace .....	10
<b>R.E. Kryukov, N.A. Kozyrev, L.P. Bashchenko, O.E. Kozyreva, A.R. Mikhno</b> Application of barium-strontium carbonate for production of welding fluxes based on silicomanganese production slag .....	8	<b>V.N. Shinkin</b> Elastoplastic bend of round steel beam. Report 1. Spring-back coefficient .....	3
<b>Yu.L. Krutskii, A.G. Tyurin, M.V. Popov, E.A. Maksimovskii, O.V. Netskina</b> Synthesis of finely dispersed vanadium carbide (VC <sub>0.88</sub> ) using nanofibrous carbon .....	4	<b>V.N. Shinkin</b> Elastoplastic bend of round steel beam. Report 2. Residual stresses .....	11
		<b>A.G. Shiryaev, S.G. Chetverikov, S.G. Chikalov, I.Yu. Pyshmin-tsev, P.V. Krylov</b> Manufacturing technologies of steel seamless tubes for production of hard-to-recover hydrocarbons .....	11
		<b>V.V. Stulov</b> On modeling processes in continuous casting mold .....	2

<b>A.A. Umanskii, L.V. Dumova</b> Integrated influence of melting parameters of rail steel on rail products quality and technical and economic indicators of the production ..... 11	<b>V.E. Bazhenov, M.V. Pikunov</b> Microsegregation of silicon in cast iron ..... 3	
<b>I.M. Yachikov, I.V. Portnova, T.P. Larina</b> Study of the behavior of current-carrying liquid in the bath of DC arc furnace by an external vertical magnetic field on a physical model ..... 1	<b>M.A. Borovykh, O.A. Chikova, V.S. Tsepelev, V.V. V'yukhin</b> Effect of heat treatment conditions on electrical resistivity of 35KhGF molten steel ..... 3	
<b>S.A. Zagainov, S.V. Filatov, S.V. Myasoedov, L.Yu. Gileva, V.N. Titov</b> Benefits and risks of blast furnaces with high intensity ..... 10	<b>A.V. Brover, G.I. Brover</b> Influence of constant magnetic field on structure formation in steels at high-speed laser processing ..... 8	
<b>S.A. Zaides, Nguen Van Khuan</b> Influence of parameters of the calibration process on bending stiffness of steel rod. Part 2 ..... 3	<b>V.I. Danilov, A.N. Smirnov, V.V. Gorbatenko, D.V. Orlova, L.V. Danilova</b> Luders deformation in weld seams ..... 2	
<b>M.Kh. Ziatdinov, I.M. Shatokhin, L.I. Leont'ev</b> SHS Technology of composition ferroalloys Part I. Metallurgical SHS process. Synthesis of ferrovandium and ferrochromium nitrides ..... 5	<b>M.V. Chukin, N.V. Koptseva, Yu.Yu. Efimova, D.M. Chukin, O.A. Nikitenko</b> Influence of high-carbon steel billet movement speed in patenting unit on structure and mechanical properties formation ..... 4	
<b>M.Kh. Ziatdinov, I.M. Shatokhin, L.I. Leont'ev</b> SHS technology of composition ferroalloys. Part II. Synthesis of ferrosilicon nitride and ferrotitanium boride ..... 7	<b>M.V. Chukin, M.A. Polyakova, K.G. Pivovarova, Yu.Yu. Efimova, A.E. Gulin</b> Investigation of structure and several properties of carbon steel of grade 50 deformed by drawing ..... 7	
<b>D.V. Zinoveev, P.I. Grudinskii, V.G. Dyubanov, L.V. Kovalenko, L.I. Leont'ev</b> Global recycling experience of red mud – a review. Part I: Pyrometallurgical methods ..... 11	<b>I.V. Chumanov, A.N. Anikeev</b> Impregnation of substrates of tungsten monocarbide with low carbon steel using contact and non-contact methods ..... 5	
<b>Yu.G. Yaroshenko, Yu.I. Lipunov, A.B. Smakhanov, M.V. Stolyarova</b> Application of water-air cooling technologies for heat treatment of bearing rings ..... 6	<b>V.E. Gromov, V.E. Kormyshev, A.M. Glezer, S.V. Konovalov, Yu.F. Ivanov</b> Gradient structure of the layer faced on HARDOX 450 steel with Fe–C–Cr–Nb–W powder wire and modified by electron beam processing ..... 4	
<b>RESOURCE SAVING IN FERROUS METALLURGY</b>		
<b>G.S. Podgorodetskii, V.B. Gorbunov, E.A. Agapov, T.V. Erokhov, O.N. Kozlova</b> Challenges and opportunities of utilization of ash and slag waste of TPP (thermal power plant). Part 1 ..... 6	<b>V.E. Gromov, A.A. Yur'ev, Yu.F. Ivanov, V.A. Grishunin, S.V. Konovalov</b> Redistribution of carbon atoms in differentially charged rails for long-term operation ..... 6	
<b>ECOLOGY AND RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES</b>		
<b>I.P. Belanov, N.B. Naumova, I.S. Semina, O.A. Savenkov</b> Metallurgical production slags – promising material for technological waste reclamation ..... 12	<b>A.I. Gusev, A.A. Usol'tsev, N.A. Kozyrev, N.V. Kibko, L.P. Bashchenko</b> Development of flux-cored wire for surfacing of parts operating under conditions of wear ..... 11	
<b>I.A. Kudryashova, E.A. Kharlampenkov, N.V. Zakharova</b> Ecological and economic aspects of vinyl chloride production based on the use of raw materials of coking plant ..... 11	<b>Yu.F. Ivanov, A.A. Yur'ev, V.E. Gromov, S.V. Konovalov, O.A. Peregudov</b> Transformation of carbide phase in rails at long-term operation ..... 2	
<b>A.S. Orlov, A.Z. Isagulov, O.R. Sariyev, M.Zh. Tolymbekov</b> Development of the smelting technology of complex aluminum-chrome-silicon-containing ASC alloy from standard raw materials ..... 9	<b>G.A. Isaev, I.A. Magidson, N.A. Smirnov</b> Ensemble of ions and their mobility in some slags for steel refining in ladle furnace ..... 1	
<b>G.S. Podgorodetskii, V.B. Gorbunov, E.A. Agapov, T.V. Erokhov, O.N. Kozlova</b> Challenges and opportunities of utilization of ash and slag waste of TPP (thermal power plant). Part 2 ..... 7	<b>A.S. Kudryavtsev, K.A. Okhapkin</b> Effect of long-term thermal aging in heat exchange equipment of fast neutron switchgears on the structure and properties of austenitic chromium-nickel steel ..... 11	
<b>E.P. Pototskii, V.M. Firsova, E.A. Sakharova</b> Account of joint effect of the complex of harmful factors and analysis of the influence of production factor of chemical nature on the level of professional risk ..... 1	<b>P.A. Kuznetsov, V.N. Klimov, D.A. Kirilenko, M.A. Yagovkina, E.A. Samodelkin</b> Structure features of the Fe – Cu – Nb – Si – B based nanocrystalline alloy ribbon produced by the melt spinning method ..... 5	
<b>A.V. Shorokhova, A.V. Novichikhin, E.N. Yur'eva</b> Socially oriented information technology of increasing the level of ecological safety of mining and metallurgical area ..... 10	<b>V.V. Myl'nikov, V.A. Skudnov</b> Influence of different state parameters on the behavior of fatigue curves ..... 3	
<b>L.M. Simonyan</b> Analysis of the methodology for determining CO <sub>2</sub> emissions on the territory of the Russian Federation in respect to the ferrous metallurgy ..... 9	<b>T.A. Nechaikina, S.A. Nikulin, S.O. Rogachev, V.Yu. Turilina, A.P. Baranova</b> Fracture resistance of “transition” area in three-layer steel/vanadium alloy/steel composite after thermomechanical treatment ..... 6	
<b>MATERIAL SCIENCE</b>		
<b>K.V. Aksenova, E.N. Nikitina, Yu.F. Ivanov, D.A. Kosinov</b> Hardening mechanisms of steels with bainite and martensite structures at compressive deformation ..... 10	<b>E.L. Nikonenko, N.A. Popova, N.R. Sizonenko, T.V. Dement, N.A. Koneva</b> Change of the structure of a heat-resistant alloy doped by rhenium and lanthanum depending on thermal processing .. 4	
<b>M.I. Aleutdinova, V.V. Fadin, K.A. Aleutdinov</b> Wear of sintered composites based on bearing steel at boundary friction with current collection against copper ..... 10	<b>G.M. Poletaev, I.V. Zorya, R.Y. Rakitin</b> Interaction of hydrogen impurity with nanocrystalline palladium and nickel ..... 8	
<b>Yu.A. Alyushin, S.M. Gorbatyuk</b> Possible mechanisms of energy dissipation in the transition from reversible deformation to irreversible ..... 3	<b>G.M. Poletaev, I.V. Zorya, R.Y. Rakitin, D.V. Kokhanenko, M.D. Starostenkov</b> Effect of deformation on migration rate of grain boundaries in nickel ..... 12	
<b>A.A. Babenko, V.I. Zhuchkov, N.I. Sel'menskikh, A.G. Upolovnikova</b> Structure and properties of 17G1S–U low-carbon pipe steel microalloyed by boron ..... 10	<b>D.A. Romanov, E.V. Protopopov</b> Model of electroerosion destruction of composite electroexplosive coatings in the conditions of spark erosion ..... 2	
<b>P.V. Bakhmatov, V.I. Murav'ev, A.V. Frolov, V.S. Pitsyk</b> Peculiarities of change in structure and properties of solid-phase compound of OT4-alloy obtained by cold forced fit and further thermal treatment ..... 12	<b>E.N. Smirnov, V.A. Sklyar, O.E. Smirnov, V.A. Belevitin, R.E. Pivovarov</b> Research of the behavior of macrostructure defects of the pre-deformed continuous cast billets during rolling ..... 5	
	<b>G.V. Shlyakhova, S.A. Barannikova, A.V. Bochkareva, Yu.V. Li, L.B. Zuev</b> Study of the structure of bimetal construction carbon steel – stainless steel ..... 4	
	<b>M.S. Stepanov, Yu.M. Dombrovskii, L.V. Davidyan</b> Evaluation of the mechanical properties of diffusion layer in the process of micro-arc steel vanadation ..... 8	
	<b>INNOVATIONS IN METALLURGICAL INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES AND MATERIALS</b>	
	<b>V.I. Lyashenko, V.Z. Dyatchin, V.P. Franchuk</b> Improvement of vibrating feeders-screens for mining and metallurgical industry ..... 6	

A.G. Nikitin, A.V. Abramov, V.V. Garyashin Mathematical model of crank-type joint clearance overtravel assessment in oscillating crank drive of jaw crusher .....	6
D.F. Sakharov, A.V. Vitushkin Power analysis of the crushing process in a cone crusher .....	12
A.N. Savel'ev, S.V. Kozlov, N.E. Vinokurov Dynamic loads influencing on elements of multi-motor hydraulic drive of CCM cooler .....	2

**PHYSICO-CHEMICAL BASICS  
OF METALLURGICAL PROCESSES**

A.A. Akberdin, U.K. Konurov, R.B. Sultangaziev Manganese capacity and optical basicity of metallurgical slags .....	1
A.A. Alexandrov, V.Ya. Dashevskii, L.I. Leont'ev Oxygen solubility in carbon-containing Fe – Co melts .....	1
A.A. Alexandrov, V.Ya. Dashevskii, L.I. Leont'ev Thermodynamics of oxygen solutions in boron-containing Fe – Ni melts .....	3
Yu.V. Bendre, V.F. Goryushkin, R.E. Kryukov, N.A. Kozyrev, L.P. Bashchenko Thermodynamic assessment of WO <sub>3</sub> reduction by carbon and silicon .....	3
E.A. But, A.V. Pavlov Solid-liquid-phase carbothermal reduction of nickel from ore-coal briquettes .....	2
N.E. Khisamutdinov, O.V. Yavoiskaya, A.V. Yavoiskii, S.N. Khisamutdinov Surface phenomena peculiarities in the BOF steelmaking bath .....	3
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 .....	10
G.G. Mikhailov, L.A. Makrovets, L.A. Smirnov Thermodynamics of the processes of interaction of liquid metal components in Fe–Mg–Al–La–O system .....	6
S.V. Mikhailitsyn, M.A. Sheksheev, S.I. Platov, A.N. Emelyushin, S.V. Naumov Investigation of viscosity of liquid welding slags and melts of electrode coatings .....	4
E.K. Mukhambetgaliev, V.E. Roshchin, S.O. Baisanov Analytical expressions for Fe – Si – Al – Mn metal system and phase composition of aluminosilicomanganese .....	7
V.N. Pustovoit, Yu.V. Dolgachev, Yu.M. Dombrovskii, Yu.A. Kornilov On shear nucleation sites at phase transformations in steel .....	2
O.Yu. Sheshukov, M.A. Mikheenkova, E.A. Vyaznikova, A.S. Bykov, L.B. Vedmid' Changes in phase composition of soderites of the Bakal deposit at heating .....	11
V.S. Shvydkii, Yu.G. Yaroshenko, N.A. Spirin, V.V. Lavrov Modeling of metalized pellets firing with the account of physico-chemical transformations in them .....	4
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 1. Reducing agent – a mixture of CO – CO <sub>2</sub> .....	9
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 <sub>2</sub> – H <sub>2</sub> O .....	10
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 3. Converted gas as a reducing agent .....	12

**INFORMATION TECHNOLOGIES  
AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY**

A.A. Akberdin, A.S. Kim, R.B. Sultangaziev Planning of numerical and physical experiment in simulation of technological processes .....	9
D.I. Gabelaya, Z.K. Kabakov, Yu.V. Gribkova Simulation of slag skull formation on the wall of CCM mold .....	1

T.V. Kiseleva, V.G. Mikhailov, I.G. Stepanov Management of ecological-economic system of coking plant .....	10
M.P. Revun, V.Yu. Zinchenko, V.I. Ivanov, A.I. Cheprasov Optimization of heating operation control in chamber-type thermal furnace .....	8
V.D. Sarychev, B.B. Khaimzon, S.A. Nevskii, A.V. Il'yashchenko, V.A. Grishunin Mathematical models of mechanisms for rolled products accelerated cooling .....	4
S.K. Sibagatullin, A.S. Kharchenko, L.D. Devyatchenko Application of Markov chains to the analysis of blast furnace operation efficiency .....	8
V.V. Zimin, I.V. Burkova, V.V. Mit'kov, A.V. Zimin Scoping of pilot testing of enterprise resource planning .....	6
A.V. Zimin, I.V. Burkova, V.V. Mit'kov, V.V. Zimin Development of training programs for users of enterprise resource planning system .....	10
V.V. Zimin, V.V. Mit'kov, A.V. Zimin Calendar planning of IT-services of the enterprise's ERP-project .....	4

**SCIENCE APPLICATION**

S.R. Rakhmanov Vibration piercing of pipe billet on the piercing press of pipe-rolling mill .....	2
---	---

**SHORT REPORTS**

A.A. Aleksandrov, V.Ya. Dashevskii Effect of titanium on oxygen solubility in Ni – Co – Cr melts .....	10
A.A. Aleksandrov, V.Ya. Dashevskii Oxygen solubility in vanadium-containing Fe – Co – Cr melts .....	7
A.A. Aleksandrov, V.Ya. Dashevskii, L.I. Leont'ev Thermodynamics of oxygen solutions in silicon-containing Fe – Co – Cr melts .....	8
V.Ya. Dashevskii, A.A. Aleksandrov Thermodynamics of oxygen solutions in aluminum-containing Ni – Cr melts .....	6
V.O. Kaledin, K.V. Tagil'tsev-Galeta, A.D. Ul'yannov Model of thermomechanical behavior of structures reinforced by fibrous plastic .....	10
S.M. Kulakov, A.I. Musatova, V.N. Kadykov Digital prototypes of man-machine system performance (in the case of drawing mills) .....	6
S.M. Kulakov, A.I. Musatova, V.N. Kadykov Normative modeling of performance of steel wire coppering unit .....	2
T.Ya. Malysheva, S.A. Pisarev, A.R. Makavetskias, Yu.Yu. Fishchenko On the use of Kovdor iron ore in sintering process .....	5
A.G. Nikitin, E.I. Demina, I.A. Bazhenov Experimental investigation of pre-curved stripe cutting by scissors .....	4
G.A. Orlov, V.V. Kotov, A.G. Orlov Analysis of the wall thickness variation of pipes under internal pressure .....	6
G.A. Orlov, A.A. Malanov, A.G. Orlov Effect of technological errors on force parameters of pipes cold rolling .....	5
G.A. Orlov, E.N. Shestakova Estimation of deformability of high-carbon steel under forging .....	12
L.I. Tishchuk, K.N. Solomonov Influence of friction on shaping of a flat blank .....	3
N.I. Zakharov, I.V. Tupilko Application of Siverts law to the study of heat and mass transfer processes during the molten metals degassing from dissolved nitrogen in an electrostatic field of subcritical strengths .....	11
O.V. Zayakin, V.A. Salina, V.I. Zhuchkov Influence of temperature on the elements reduction from chromium-containing ore-lime melt .....	12

**IN ORDER OF DISCUSSION**

Yu.S. Kuznetsov, O.I. Kachurina Redox properties of the gas phase .....	1
V.P. Malyshev, A.M. Makasheva Description of dynamic viscosity depending on the alloys composition and temperature using state diagrams .....	9
To the 90th Anniversary of Boris Vadimovich Linchevskii .....	6

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 26.12.2018. Формат 60×90 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бум. офсетная № 1.  
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,5. Заказ 8847. 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

IMPROVING DYNAMIC REGIME OF ROLLING FOR INCREASING DURABILITY OF BALL-ROLLING MILL ROLLS

DIRECT STEEL ALLOYING BY MANGANESE UNDER RECENT CONDITIONS OF ELECTRIC STEEL-MAKING

EFFICIENCY OF HARDENING OF METALLURGICAL EQUIPMENT SPARE PARTS BY HARD ALLOY

STUDY OF THE OXIDATION DEGREE OF CHROMIUM IN OXIDE-FLUORIDE SLAGS FOR ESR

THERMODYNAMIC MODELING OF NICKEL AND IRON REDUCTION FROM MULTICOMPONENT SILICATE MELT IN BUBBLING PROCESS. REPORT 3. CONVERTED GAS AS A REDUCING AGENT

PECULIARITIES OF CHANGE IN STRUCTURE AND PROPERTIES OF SOLID-PHASE COMPOUND OF OT4-1ALLOY OBTAINED BY COLD FORCED FIT AND FURTHER THERMAL TREATMENT

EFFECT OF DEFORMATION ON MIGRATION RATE OF GRAIN BOUNDARIES IN NICKEL

POWER ANALYSIS OF THE CRUSHING PROCESS IN A CONE CRUSHER

METALLURGICAL PRODUCTION SLAGS – PROMISING MATERIAL FOR TECHNOLOGICAL WASTE RECLAMATION

INFLUENCE OF TEMPERATURE ON THE ELEMENTS REDUCTION FROM CHROMIUM-CONTAINING ORE-LIME MELT

ESTIMATION OF DEFORMABILITY OF HIGH-CARBON STEEL UNDER FORGING

INDEX OF ARTICLES "IZVESTIYA VUZov. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY" FOR 2018.  
Vol. 61