

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

# ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

---

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

---

№ 5, 2016

Издается с января 1958 г. ежемесячно

Том 59

---

# ИЗВЕСТИЯ

## ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

### ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

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

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

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

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

#### Члены редакционной коллегии:

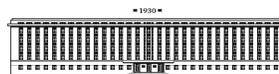
АЛЕШИН Н.П. (Российская Академия Наук, г. Москва)  
АСТАХОВ М.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)  
АШИХМИН Г.В. (ОАО «Институт Цветметобработка», г. Москва)  
БЕЛОВ В.Д. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)  
БРОДОВ А.А., редактор раздела «**Экономическая эффективность металлургического производства**» (ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва)  
ВОЛЫНКИНА Е.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)  
ГЛЕЗЕР А.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)  
ГОРБАТЮК С.М. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)  
ГРИГОРОВИЧ К.В., редактор раздела «**Металлургические технологии**» (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)  
ГРОМОВ В.Е. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)  
ДУБ А.В. (ЗАО «Наука и инновации», г. Москва)  
ЗИНГЕР Р.Ф. (Институт Фридриха-Александра, Германия)  
ЗИНИНГРАД М. (Институт Ариэля, Израиль)  
ЗОЛОТУХИН В.И. (Тульский Государственный Университет, г. Тула)  
КОЛОКОЛЬЦЕВ В.М. (Магнитогорский государственный технический университет, г. Магнитогорск)  
КОСТИНА М.В. (Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, г. Москва)  
КОСЫРЕВ К.Л. (АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва)  
КУРНОСОВ В.В. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)

ЛАЗУТКИН С.С. (ГК «МетПром», г. Москва)  
ЛИНН Х. (ООО «Линн Хай Терм», Германия)  
ЛЫСАК В.И. (Волгоградский Государственный Технический Университет, г. Волгоград)  
МЫШЛЯЕВ Л.П. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)  
НИКУЛИН С.А. (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)  
ПОДГОРОДЕЦКИЙ Г.С., редактор раздела «**Ресурсосбережение в черной металлургии**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)  
ПЫШМИНЦЕВ И.Ю., редактор раздела «**Инновации в металлургическом и лабораторном оборудовании, технологиях и материалах**» (Российский научно-исследовательский институт трубной промышленности, г. Челябинск)  
РАШЕВ Ц.В., редактор раздела «**Стали особого назначения**» (Академия наук Болгарии, Болгария)  
СИМОНЯН Л.М., редактор раздела «**Экология и рациональное природопользование**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)  
СОЛОДОВ С.В., редактор раздела «**Информационные технологии и автоматизация в черной металлургии**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)  
СПИРИН Н.А. (Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург)  
ТАНГ ГУОИ (Институт перспективных материалов университета Циньхуа, г. Шеньжень, Китай)  
ТЕМЛЯНЦЕВ М.В. (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)  
ФИЛОНОВ М.Р., редактор раздела «**Материаловедение**» (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва)  
ШПАЙДЕЛЬ М.О. (Швейцарская академия материаловедения, Швейцария)  
ЮРЬЕВ А.Б. (ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк)

#### Учредители:



Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»



Сибирский государственный индустриальный университет

Настоящий номер журнала подготовлен к печати  
Национальным исследовательским технологическим университетом «МИСиС»

#### Адреса редакции:

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

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

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

# IZVESTIYA

## VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA

---

# IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY

---

**Editor-in-Chief:** LEONT'EV L.I.

(Russian Academy of Sciences, Moscow)

**Deputy Editor-in-Chief:** PROTOPOPOV E.V.

(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

**Responsible Secretary:** POLULYAKH L.A.

(National Research Technological University "MISIS", Moscow)

**Deputy Responsible Secretary:** OLENDARENKO N.P.

(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

---

### Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

M. ZININGRAD (Ariel University, Israel)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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)

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

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

M. SPEIDEL (Swiss Academy of Materials, Switzerland)

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

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

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

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

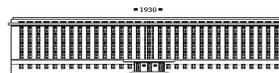
A.B. YUR'EV (OJSC "ZSMK", Novokuznetsk)

---

### Founders:



National Research Technological University "MISIS"



Siberian State Industrial University

---

This issue of the journal was prepared by  
National Research Technological University "MISIS"

### Editorial Addresses:

119049, Moscow, Leninskii prosp., 4  
National Research Technological University "MISIS",  
Tel./fax: +7 (495) 638-44-11, +7 (499) 236-14-27  
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@misis.ru  
www.fermet.misis.ru

654007, Novokuznetsk, Kemerovo region,  
Kirova str., 42  
Siberian State Industrial University,  
Tel.: +7 (3843) 74-86-28  
E-mail: redjizvz@sibsiu.ru

---

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

---

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

- Алпатова А.А., Симомян Л.М., Исакова Н.Ш. Изучение процесса пылеобразования при дуговом нагреве оцинкованной стали ..... 293
- Орелкина Д.И., Петелин А.Л., Полулях Л.А., Подгородецкий Г.С. Модель расчета концентрации вторичных металлургических выбросов в атмосфере ..... 300

### МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Леонтьев Л.И., Алымов М.И. Фундаментальные исследования как основа создания новых материалов и технологий в области металлургии. Часть 2. Порошковые наноматериалы ..... 306
- Абдыкирова Г.Ж., Тәнекеева М.Ш., Сыдыков А.Е., Дюсенова С.Б. Оценка возможности получения электролитического диоксида марганца из очищенных растворов после выщелачивания марганецсодержащего шлама ..... 314
- Бородин А.А., Кабулова Е.Г., Положенцев К.А. Анализ получаемого видеоизображения для определения отклонений технологического процесса при переплаве расходоуемых электродов в вакуумной дуговой печи ..... 318
- Смирнов Е.Н., Скляр В.А., Белевитин В.А., Шмыгля Р.А., Смирнов О.Е. Развитие подходов к исследованию на физических моделях механизмов «залечивания» дефектов сплошности осевой зоны непрерывнолитой заготовки ..... 322
- Юрьев Б.П., Гольцев В.А. Изучение теплофизических свойств титаномагнетитовых качканарских окатышей ..... 328

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

- Сотников А.Л. Диагностирование электромеханического привода механизма качания кристаллизатора МНЛЗ ..... 334

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

- Еремин А.В., Стефанюк Е.В., Абишева Л.С. Идентификация источника теплоты на основе аналитического решения задачи теплопроводности ..... 339
- Фомин С.Я. Разработка алгоритмической структуры АРМ системы ситуационного управления трубным производством ..... 347

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Писарев С.А., Куренков Д.С., Малышева Т.Я. Особенности поведения магнетитовых руд Ковдорского месторождения в аглопроцессе ..... 354
- Вольфсон Е.Ф. Эффект Горского (к 80-летию выдающегося открытия В.С. Горского) ..... 357

## CONTENTS

### RESOURCE SAVING IN FERROUS METALLURGY

- A.A. Alpatova, L.M. Simonyan, N.Sh. Isakova The study of dust formation during arc melting of zinc-coated steel ..... 293
- D.I. Orelkina, A.L. Petelin, L.A. Polulyakh, G.S. Podgorodetskii Calculation model for the concentration of secondary metallurgical emissions into the atmosphere ..... 300

### METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- L.I. Leont'ev, M.I. Alymov Fundamental investigations as the basis of creation of new materials and technologies in metallurgy. Part 2. Powder nanomaterials ..... 306
- G.Zh. Abdykirova, M.Sh. Tanekeeva, A.E. Sydykov, S.B. Dyusenova Assessment of the possibility of producing of electrolytic manganese dioxide from the purified solutions after manganese-sludge leaching ..... 314
- A.A. Borodin, E.G. Kabulova, K.A. Polozhentsev Method for determining the deviations of technological process for remelting the consumable electrodes in a vacuum arc furnace by the video image ..... 318
- E.N. Smirnov, V.A. Sklyar, V.A. Belevitin, R.A. Shmyglya, O.E. Smirnov Development of the study of mechanism of "healing" defects of continuous cast billet axial zone on a physical model ..... 322
- B.P. Yur'ev, V.A. Gol'tsev The study of thermal properties of titanium-magnetite Kachkanar pellets ..... 328

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

- A.L. Sotnikov Diagnostics of electromechanical drive of the CCM mold oscillation mechanism ..... 334

### INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

- A.V. Eremin, E.V. Stefanyuk, L.S. Abisheva Heat source identification based on analytical solutions of the heat-conduction problem ..... 339
- S.Ya. Fomin Development of the algorithmic structure ARM of situational control system of pipe production ..... 347

### SHORT REPORTS

- S.A. Pisarev, D.S. Kurenkov, T.Ya. Malysheva Behavior of magnetite ores of Kovdor deposit in sintering process ..... 354
- Vol'fson E.F. To the 80th Anniversary of the famous opening of V.S. Gorskii ..... 357

УДК 669.187.2:628.511.12

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ДУГОВОМ НАГРЕВЕ ОЦИНКОВАННОЙ СТАЛИ

*Алпатова А.А., старший преподаватель кафедры  
металлургии стали и ферросплавов (aakhilko01@gmail.com)*  
*Симомян Л.М., д.т.н., профессор кафедры металлургии стали и ферросплавов*  
*Исакова Н.Ш., студент*

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

**Аннотация.** Изучен процесс образования пыли при плазменно-дуговом нагреве оцинкованной стали в атмосфере аргона при силе тока от 170 – 190 А, расходе аргона 0,06 м<sup>3</sup>/ч, давлении в камере печи 0,1 МПа. Установлено, что цинк практически полностью испаряется в течение первых 30 с плавки. Структура уловленной цинксодержащей пыли неоднородна: наблюдаются частицы различных форм (сферические, игольчатые, шаровидные пленчатые), размеров и состава. Проведен анализ элементного состава отдельных частиц образующейся пыли на спектрометре iCAP 6300 фирмы Thermo Electron Corporation (США), на основе которого оценен их оксидный состав с использованием программы «Терра». Показано, что в состав пыли входят частицы, состоящие из ZnO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, углерода и чистого железа. По результатам работы сделан вывод о том, что при плазменной плавке оцинкованной стали цинксодержащую пыль можно улавливать отдельно от остальной пыли в начальный период плавки.

**Ключевые слова:** дуговой нагрев, цинк, испарение, оцинкованная сталь, структура, частицы, состав, фаза.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-5-293-299

В связи с увеличением потребления цинка и свинца все большее предпочтение отдается разработкам ресурсосберегающих технологий извлечения их из вторичного сырья. Во многих странах проводятся исследовательские работы по поиску наилучших технологий переработки металлургических пылей и шламов. Задача усложняется их переменным составом и свойствами, что требует для каждого металлургического предприятия разработки технологии в соответствии с характеристиками образующихся отходов.

### Ресурсы цинка и их потребление

Объем мирового потребления цинка – около 14,5 млн т/год. На протяжении последнего десятилетия среднегодовой темп роста рынка цинка составлял около 3,5 %. При этом добыча цинковых руд не успевает обеспечить необходимую в них потребность [1, 2].

В настоящее время приблизительно 60 % потребляемого в мире цинка производится из добытых руд, остальные 40 % – из цинксодержащих отходов и металлического лома. В мире на сегодняшний день собирается и перерабатывается более 90 % цинксодержащих отходов. Обычно это отходы производства, либо отслужившие свой срок конструкции, машины, оборудование и бытовая техника.

Следует ожидать дальнейшего роста потребления цинка, который используется на оцинкование

(45 – 60 %), в медицине (10 %), в производстве сплавов (10 %), резиновых шин (10 %) и масляных красок (10 %) [3].

Исследование процесса извлечения цинка из вторичных ресурсов, таких как металлургическая пыль, является требованием времени. Не менее важным является изучение процессов формирования цинксодержащей пыли при переплаве оцинкованного лома в сталеплавильных агрегатах. Это необходимо для селективного извлечения цинка или обогащенного цинком продукта в процессе их образования, что при дальнейшей переработке позволит извлечь цинк с меньшими затратами.

Целью работы является изучение процесса испарения цинка, а также состава и структуры пыли, образующейся при дуговом нагреве оцинкованной стали.

### Методика исследования образования цинковой пыли

Эксперименты проводили в лабораторной плазменно-дуговой установке (ЛПДУ-1). Процесс плавки происходит в результате нагрева образца металла электрической дугой постоянного тока, стабилизированной потоком нейтрального газа аргона.

В качестве объекта исследования использовали куски оцинкованного стального листа марки Ст20. Толщина стального листа 0,541 мм, поверхностная плотность

цинкового покрытия ( $\approx 100\% \text{ Zn}$ )  $137,5 \text{ г/м}^2$  с каждой стороны. Химический состав стали Ст20, % (по массе), приведен ниже:

C	0,17 – 0,24
Si	0,17 – 0,37
Mn	0,35 – 0,65
Ni	до 0,30
S	до 0,04
P	до 0,035
Cr	до 0,25
Cu	до 0,30

Для проведения эксперимента использовали пластинки размером  $10 \times 10 \text{ мм}$  по 7 шт. на одну плавку. При поверхностной плотности покрытия цинка  $137,5 \text{ г/м}^2$  масса цинка на одной стороне пластины ( $100 \text{ мм}^2$ ) составит  $m'_{\text{Zn}} = 137,5 \cdot 10^{-4} = 0,0138 \text{ г}$ , на обеих сторонах  $m_{\text{Zn}} = 0,0138 \cdot 2 = 0,0275 \text{ г}$ . В результате шихта (образец) на 1 плавку будет содержать  $0,0275 \cdot 7 = 0,1925 \text{ г}$  цинка, что составляет около 5,9 %.

### Параметры плавки в ЛПДУ

Исследуемый образец железа (около 3 г), обмотанный проволокой, помещали в графитовый тигель с внутренним диаметром 12 мм и высотой 8 мм и устанавливали на водоохлаждаемую медную подложку (анод), обеспечивая контакт с катодом. Межэлектродное расстояние составляло 7 мм. Камеру герметизировали, откачивали воздух, заполняли аргоном, включали систему водоохлаждения, регулятор тока, устанавливали необходимое значение силы тока от 167 до 187 А, рабочее напряжение 27 – 28 В, мощность разряда 4,5 – 5,2 кВт. Расход аргона составлял  $0,06 \text{ м}^3/\text{ч}$ , давление в камере печи – 0,1 МПа, продолжительность дугового нагрева – от 5 до 150 с. За процессом плавки наблюдали через два смотровых окошка.

Результаты экспериментов приведены в таблице.

Скорость испарения в начальный период плавки ( $< 15 \text{ с}$ ) высока ( $0,02 \text{ г/с}$ ), при увеличении длительности обработки она уменьшается и составляет  $0,008 \text{ г/с}$  (рис. 1, б). Это объясняется тем, что за первые 15 с из  $0,1925 \text{ г}$  цинка, находящегося в шихте, испаряется  $0,14 \text{ г}$  и степень извлечения составляет  $0,14/0,1925 \cdot 100\% = 72,7\%$ . Очевидно, что за 30 с испаряется весь цинк и 1,5 % железа.

### Термодинамический анализ

Термодинамический анализ испарения чистых элементов – цинка и железа в зависимости от температуры (рис. 2) показал, что при температуре до 1200 К цинк испаряется незначительно, но при достижении 1200 К он из конденсированной фазы полностью переходит в газовую фазу, т. е. испаряется, что подтверждается исследованиями [4]. При температуре от 2000 К и выше начинает испаряться железо и при 3200 К оно полностью переходит в газовую фазу. Это подтверждают полученные в эксперименте результаты, если предположить, что температура 1200 К достигается в первые 15 с.

Как было показано в работе [6], температура поверхности металла в лабораторной дуговой установке может за 60 с достигать 2655 К. При этом практически весь цинк и частично железо переходят в газовую фазу.

В результате проведенных экспериментов установлено, что в начальный период расплавления шихты в процессе электроплавки протекает интенсивное испарение цинка, что подтверждается данными работы [7]. Пары цинка и железа образуются с временным интервалом, следовательно в дуговых печах цинк можно уловить в начальный период плавки в процессе нагрева и расплавления шихты, что дает возможность получить пыль в виде цинкового порошка или оксида для дальнейшего использования в различных сферах его

### Результаты экспериментов

#### Results of the experiments

Показатель	Образец						
	1	2	3	4	5	6	7
Время плавки $t$ , с	5	15	30	60	90	120	150
Масса образца $m$ , г:							
– до плавки	3,09	3,23	3,19	3,23	3,23	3,27	3,23
– после плавки	2,99	3,09	2,95	2,77	2,49	2,35	2,06
Изменение массы $\Delta m$ , г	0,10	0,14	0,24	0,46	0,74	0,92	1,17
Масса пыли со стенок камеры печи, г	0,03	0,05	0,05	0,11	0,32	0,16	0,23
Масса пыли с медного тигля, г	0,05	0,11	0,19	0,29	0,19	0,31	0,25
Скорость испарения, $\Delta m/t$ , г/с	0,02	0,0093	0,0080	0,0077	0,0082	0,0077	0,0078

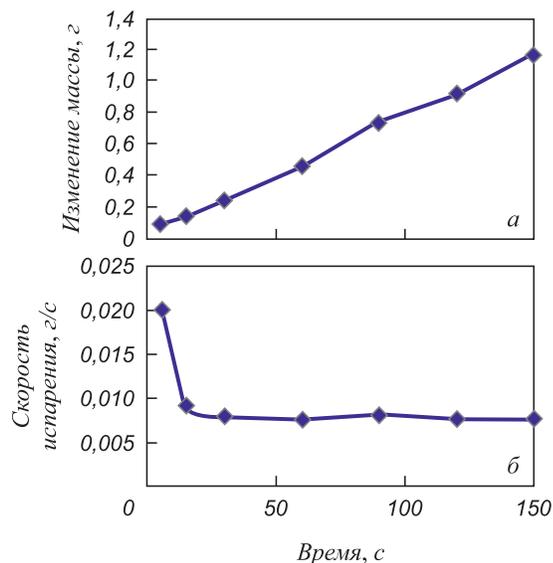


Рис. 1. Зависимости изменения массы образца (а) и скорости испарения (б) от времени

Fig. 1. Dependence of changes of the sample (a) weight and evaporation rate (b) on time

применения, не требующих дальнейшего разделения от железа.

### Исследование пыли

В процессе плавки оцинкованной стали образующиеся пары конденсировались на холодных стенках камеры печи. Собранную после экспериментов пыль изучали с использованием рентгеноспектрального

анализа на растровом электронном микроскопе JEOL JSM-6610LV.

На рис. 3 приведены электронные фотографии образцов пыли, собранной после плавки оцинкованной стали в течение 120 с ( $I = 167$  А). Видно, что структура порошка неоднородна, встречаются и сферические частицы (предположительно, оксиды железа), и частицы различных форм и размеров.

На рис. 3, б показана сферическая частица диаметром 25 мкм при увеличении в 2700 раз. Можно видеть, что она имеет гетерогенную структуру, характерную для оксидов железа [8, 9]. В состав сферической частицы входят железо (87 %), углерод (3,7 %), кислород (8,8 %), цинк (0,5 %) (рис. 3, в). Этот способ не идентифицирует оксиды металлов. Зная элементный состав, можно оценить наличие оксидов.

Расчеты по программе «Терра» подтвердили наличие во вторичной пыли 80 %  $Fe_3O_4$ , 11,7 %  $Fe_{(конд)}$  и 5,9 %  $C_{тв}$ , поэтому можно предположить, что данная частица состоит из магнетита  $Fe_3O_4$  и чистого железа [10]. Наличие оксидов связано с тем, что в камере лабораторной установки присутствует остаточный кислород.

В образце пыли также встречаются агрегаты различных размеров от 3 до 30 мкм (рис. 4, а). При увеличении в 25 000 раз на микрофотографии (рис. 4, б) видно, что данные агрегаты состоят из округлых частиц размером от 175 до 500 нм, слипшихся в единую массу [11, 12]. Рентгеновский анализ данных агрегатов определил наличие в них 39 % Fe, 22 % O, 21 % Zn, 10,5 % C, 6,5 % Cu (рис. 4, в). Оценка фазового состава по программе «Терра» показала, что

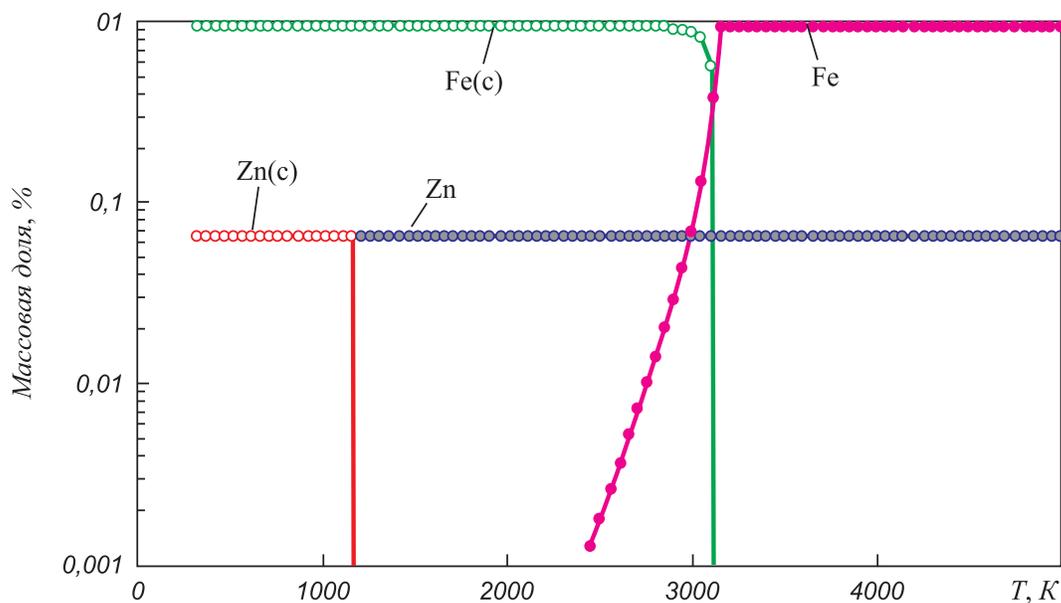


Рис. 2. Зависимость содержания чистых цинка и железа в газовой фазе от температуры (расчет по программе «Терра»): (с) относится к жидкому и твердому состоянию вещества, без (с) – к пару [5]

Fig. 2. Dependence of the content of pure zinc and iron in gas phase on the temperature (calculated by TERRA program): (c) – refers to liquid and solid state, without (c) – to vapor [5]

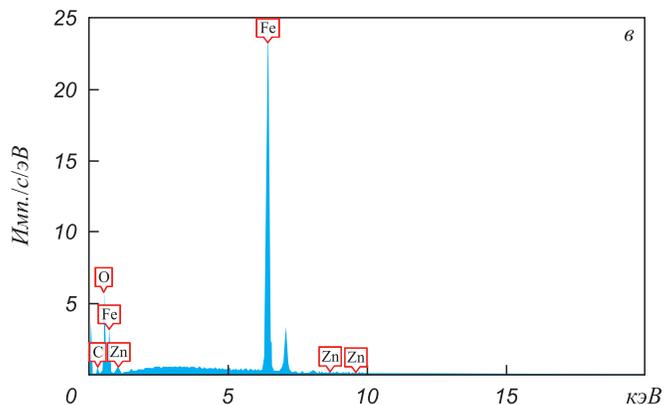
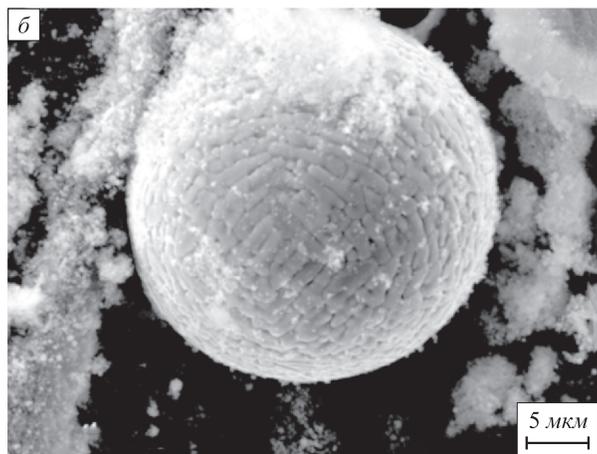
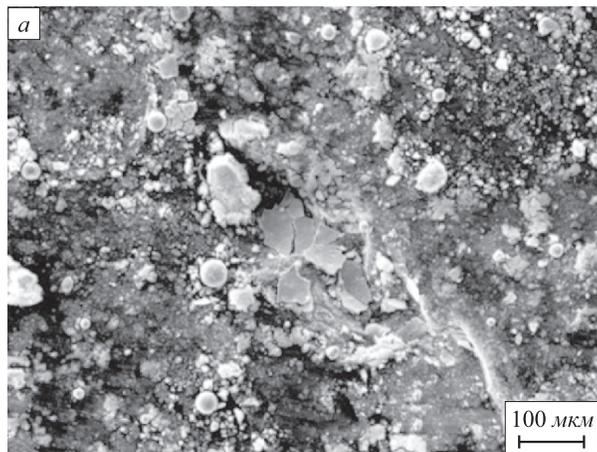


Рис. 3. Электронные микрофотографии пыли, собранной со стенок камеры ЛПДУ после плавки оцинкованной стали (образец 1): а – общий вид пыли; б – отдельная сферическая частица; в – результаты рентгеноспектрального анализа сферической частицы

Fig. 3. Electronic microphotographs of the dust collected from the chamber walls of laboratory plasma arc unit (LPAU) after melting of galvanized steel (sample 1):

а – general view of the dust; б – a separate spherical particle; в – the results of X-ray analysis of a spherical particle

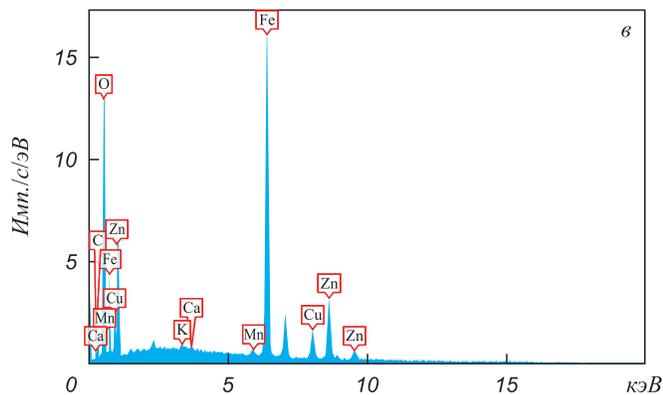
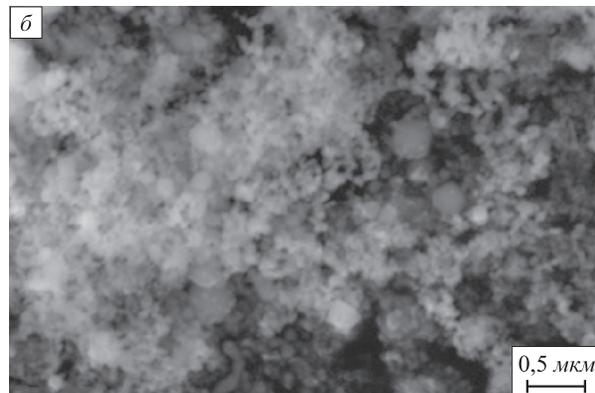
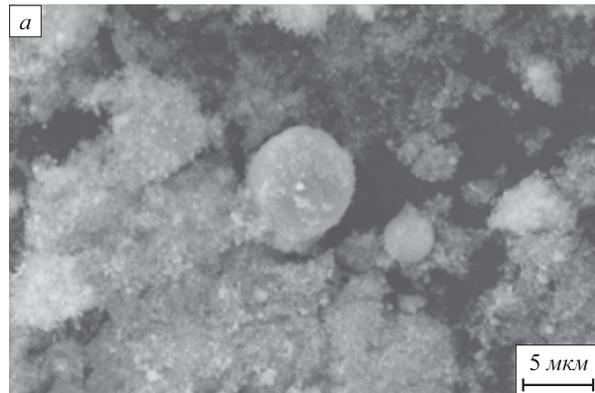


Рис. 4. Электронные микрофотографии губчатых агрегатов пыли, собранной со стенок камеры ЛПДУ после плавки оцинкованной стали (образец 1):

а – общий вид пыли; б – агрегаты, слипшиеся в единую массу; в – результаты рентгеноспектрального анализа агрегатов

Fig. 4. Electron microphotographs of spongy units of dust collected from the LPAU chamber walls after melting of galvanized steel (sample 1):

а – general view of the dust; б – units, bound together into a single mass; в – the results of X-ray analysis of units

они состоят из оксидов железа  $Fe_3O_4$  (50,6 %), цинка ZnO (31,9 %), а также углерода C (15,6 %) и чистого железа Fe (1,9 %). Полученные результаты согласуются с литературными данными о составе частиц пыли, в которых содержание цинка может достигать 57 % [13 – 15].

При увеличении силы тока ( $I = 50 \text{ A}$ ,  $t = 120 \text{ c}$ ) при плавке оцинкованной стали в пыли наблюдаются игольчатые образования (см. рис. 5, б).

При увеличении в 3000 раз (рис. 5, б) видно, что частицы имеют игольчатую структуру длиной от 1 до 20 мкм. Точечный рентгеноспектральный анализ показал, что в составе данных частиц преобладают углерод (53,1 %), цинк (18,9 %), кислород (23,2 %). Кроме того, в небольших количествах присутствуют железо (4,2 %) и медь (0,6 %).

При пересчете на оксидный состав с помощью программы «Терра» получено, что игольчатые структуры могут иметь в своем составе оксид цинка ( $ZnO = 31,1 \%$ ) и углерод ( $C_{\text{тв}} = 62,9 \%$ ). Возможно, что при увеличении силы тока более интенсивно испаряется графитовый катод и при конденсации углерод формирует цепочки, похожие на игольчатую структуру. Пары цинка могут осаждаться на частицах углерода.

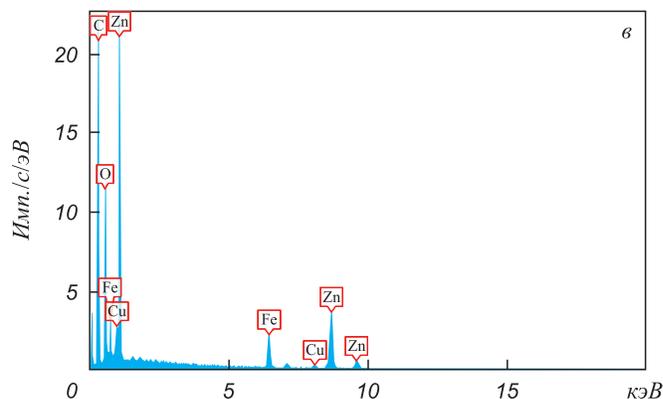
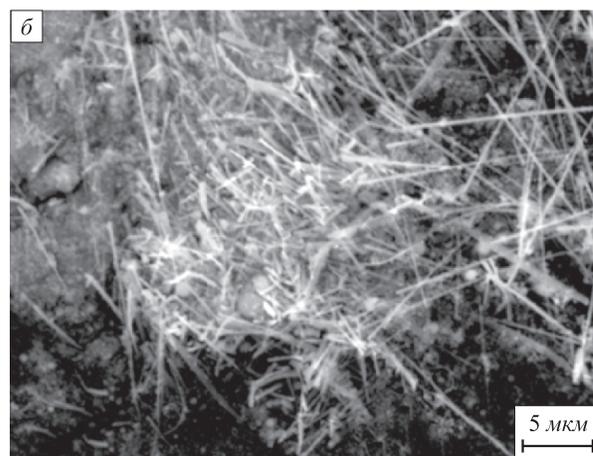
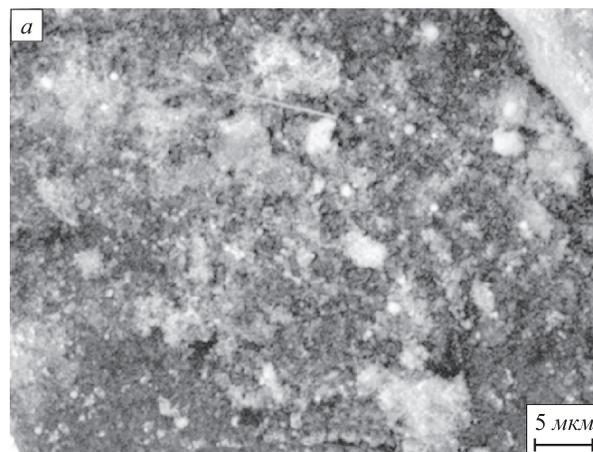
В пыли также были обнаружены объемные шаровидные пленчатые структуры (рис. 6, а), состоящие из углерода (71,8 %) и железа (26,6 %) (рис. 6, б). Процесс формирования этих частиц требует дальнейшей проработки.

Можно сделать вывод, что условия плавки оцинкованной шихты существенно влияют на структуру пыли и ее химический и дисперсный состав. Результаты исследования влияния технологических параметров на пылеобразование при выплавке электростали позволяют получать пыль определенной структуры и состава для дальнейшего использования в различных сферах применения полученного порошка без его переработки или с частичной обработкой в зависимости от заявленных требований.

**Выводы.** Установлено, что при плазменной плавке оцинкованной стали цинк практически полностью испаряется в течение первых 30 с.

Структура цинксодержащей пыли при плавке оцинкованной стали неоднородна. Наряду со сферическими частицами оксида железа присутствуют губчатые агрегаты из оксидов цинка, шаровидные и игольчатые частицы (наночастицы) из цинка и углерода.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что частицы разного размера и состава образуются с временным разрывом в разных температурных зонах, поэтому их можно улавливать селективно. Они могут стать объектом для дальнейшего исследования и выявления сфер их непосредственного применения.



Элемент	% (вес)	$\sigma$
C	53,1	0,2
O	23,2	0,2
Zn	18,9	0,2
Fe	4,2	0,1
Cu	0,6	0,1

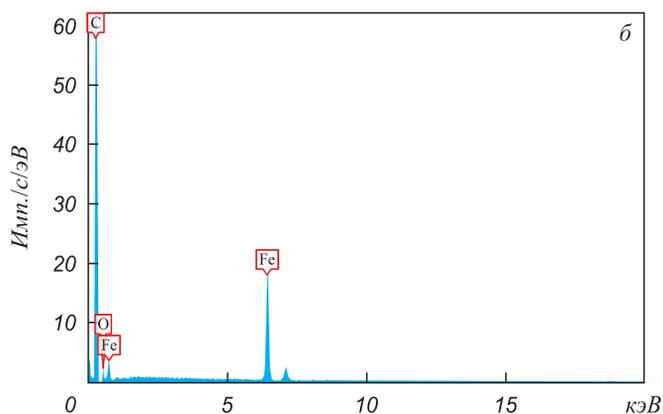
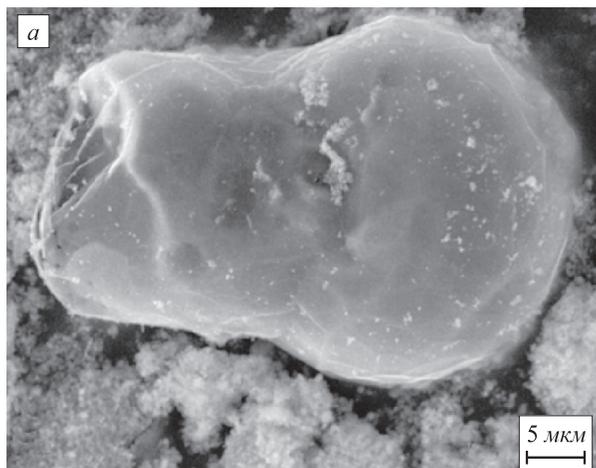
Рис. 5. Электронные микрофотографии пыли, собранной со стенок камеры ЛПДУ после плавки оцинкованной стали (образец 2): а – общий вид пыли; б – игольчатая структура; в – результаты рентгеноспектрального анализа игольчатой структуры

Fig. 5. Electron micrographs of the dust collected from the LPAU chamber walls after melting of galvanized steel (sample 2): а – general view of the dust; б – needle structure; в – the results of X-ray analysis of the needle structure

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мировой рынок цинка. <http://www.cmmarket.ru/markets/znworld.htm> (дата обращения 15.08.2013).
2. International Lead and Zinc Study Group. <http://www.ilzsg.org/static/statistics.aspx?from=20>.
3. Обгон завершен. «Русмет». <http://metaldaily.ru/news/news50255.html>.
4. Доронин И.Е., Свяжин А.Г. Термодинамическое исследование взаимодействия углерода с компонентами сталеплавильной пыли // *Металлург*. 2013. № 1. С. 52 – 57.
5. Трусов Б.Г. Программная система «Тетра» для моделирования фазового и химического равновесия // *Тр. XXIV Междунар. конф. по химической термодинамике*. – С.-Петербург, 2002.
6. Исакова Н.Ш., Симонян Л.М., Хилько А.А. Изучение процесса пылеобразования при дуговом нагреве металлов // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2014. № 3. С. 3 – 9.
7. Popielska-Ostrowska P., Siwka J., Sorek A., Niesler M. Dust arising during steelmaking processes // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2012. No. 55/2. P. 772 – 776.
8. Перескока В.В., Камкина Л.В., Пройдак Ю.С. и др. Восстановительно-тепловая обработка пыли электрофильтров дуговой сталеплавильной печи // *Вісник приазовського державного технічного університету. Технічні науки*. 2010. № 21. С. 13 – 16.
9. Guezennec A.G., Huber J.Ch., Patisson F. etc. Dust formation in electric arc furnace: birth of the particles // *Published in Powder Technology*. 2005. Vol. 157. No. 1 – 3. P. 2 – 11.
10. Стовпченко А.П., Камкина Л.В., Пройдак Ю.С. и др. Теоретические и экспериментальные исследования состава и восстановимости пыли дуговых сталеплавильных печей // *Электрометаллургия*. 2009. № 8. С. 29 – 36.
11. Хилько А. А., Симонян Л.М., Лысенко А.А. и др. Морфологические особенности электросталеплавильной пыли // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2013. № 5. С. 3 – 6.
12. Симонян Л.М., Хилько А.А., Лысенко А.А. и др. Электросталеплавильная пыль как дисперсная система // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2010. № 11. С. 68 – 75.
13. Sekula R., Wnek M., Selinger A., Wróbel M. Electric arc furnace dust treatment: investigation on mechanical and magnetic separation methods // *Waste Management & Research*. 2001. Vol. 19. No. 4. P. 271 – 275.
14. Kukuruga F., Havlik T., Kekki A., Forsen O. Chemical and structural characterization of different steelmaking dusts from stainless steel production // *Kammel's Quo Vadis Hydrometallurgy*. 2012. No. 6. P. 93 – 101.
15. Korneev V.P., Sirotinkin V.P., Petrakova N.V. etc. Physicochemical properties of the zinc-containing dusts of electric furnace steel making // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2013. Vol. 2013. No. 7. P. 507 – 512.

Поступила 27 октября 2015 г.



Элемент	% (вес)	$\sigma$
Fe	71,8	0,1
O	26,6	0,1
C	1,7	0,1

Рис. 6. Электронные микрофотографии пленочной частицы пыли, собранной со стенок камеры ЛПДУ после плавки оцинкованной стали (образец 2):

*a* – пленчатая структура; *б* – результаты рентгеноспектрального анализа пленчатой структуры

Fig. 6. Electron micrographs of membranous particle of dust collected from the LPAU chamber walls after melting of galvanized steel (sample 2):

*a* – membranous structure; *b* – the results of X-ray analysis of the membranous structures

THE STUDY OF DUST FORMATION DURING ARC MELTING OF ZINC-COATED STEEL

A.A. Alpatova, L.M. Simonyan, N.Sh. Isakova

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

**Abstract.** The formation of dust was studied when plasma arc heating of galvanized steel in argon atmosphere at amperage from 170 – 190 A, argon consumption – 0.06 m<sup>3</sup>/h, pressure in the furnace – 0.1 MPa. It was found that zinc is almost completely evaporated during the first 30 seconds of melting. The structure of collected zinc containing dust

is not homogenous; there are particles of different shapes (spherical, needle, spherical and filmy), sizes and composition. The elemental composition of individual particles of formed dust was analyzed at iCAP 6300 spectrometer (Thermo Electron, USA), on the basis of which their oxide composition was evaluated using TERRA program. It was shown that the dust is composed of particles, consisting of ZnO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, pure iron and carbon. Based on the results of the work it was concluded that during plasma-smelting of galvanized steel zinc containing dust can be trapped separately from the remaining dust in the initial period of melting.

**Keywords:** arc heating, zinc, evaporation, galvanized steel, structure, particle composition, phase.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-5-293-299

## REFERENCES

1. *Mirovoi rynek tsinka* [Global zinc market]. Available at URL: [www.cmmarket.ru/markets/znworld.htm](http://www.cmmarket.ru/markets/znworld.htm) (Accessed: 15.08.2013). (In Russ.).
2. *International Lead and Zinc Study Group*. Available at URL: <http://www.ilzsg.org/static/statistics.aspx?from=20>
3. *Obgon zavershen. "Rusmet"* [Overtaking is completed. "Rusmet"]. Available at URL: <http://metaldaily.ru/news/news50255.html>. (In Russ.).
4. Doronin I.E., Svjazhin A.G. Thermodynamic study of carbon reaction with steel-smelting dust components. *Metallurgist*. 2013, vol. 57, no. 1–2, pp. 41–48.
5. Trusov B.G. Software system "Terra" for phase and chemical equilibrium modeling. In: *Tr. XXIV Mezhdunar. konf. po khimicheskoi termodinamike* [Proceedings of the XXIV Intern. conf. on Chemical Thermodynamics]. St. Petersburg: 2002. (In Russ.).
6. Isakova N.Sh., Simonyan L.M., Khil'ko A.A. The research of dust formation during the arc heating of metals. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 3, pp. 3–9. (In Russ.).
7. Popielska-Ostrowska P., Siwka J., Sorek A., Niesler M. Dust arising during steelmaking processes. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2012, vol. 55, Issue 2, pp. 772–776.
8. Pereskoka V.V., Kamkina L.V., Proidak Yu.S., Stovpchenko A.P., Kvichanskaya M.I. Restorative -heat treatment dust of EAF electrofilters. *Visnik priazovs'kogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Tekhnichni nauki*. 2010, no. 21, pp. 13–16. (In Russ.).
9. Guezennec A.G., Huber J.Ch., Patisson F., Sessiecq P., Birat J.P., Ablitzer D. Dust formation in electric arc furnace: birth of the particles. *Powder Technology*. 2005, vol. 157, no. 1–3, pp. 2–11.
10. Stovpchenko A.P., Kamkina L.V., Proidak Yu.S., Derevyanchenko I.V., Kucherenko O.L., Bondarenko M.Yu. Theoretical and experimental studies of the composition and the recoverability of EAF dust. *Elektrometallurgiya*. 2009, no. 8, pp. 29–36. (In Russ.).
11. Khil'ko A.A., Simonyan L.M., Lysenko A.A., Astashkina O.V., Mikhilchan A. A. Morphological features of eaf dust. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 5, pp. 3–6. (In Russ.).
12. Simonyan L.M., Khil'ko A.A., Lysenko A.A., Mikhilchan A.A., Sel'nikova P.Yu. Iron and steel electrometallurgical dust as disperse system. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 11, pp. 68–75. (In Russ.).
13. Sekula R., Wnek M., Selinger A. and Wróbel M. Electric arc furnace dust treatment: Investigation on mechanical and magnetic separation methods. *Waste Management & Research*. 2001, vol. 19, no. 4, pp. 271–275.
14. Kukurugya F., Havlik T., Kekki A., Forsen O. Chemical and structural characterization of different steelmaking dusts from stainless steel production. *Kammel's Quo Vadis Hydrometallurgy*. 2012, no. 6, pp. 93–101.
15. Korneev V.P., Sirotinkin V.P., Petrakova N.V., Dyubanov V.G., Leont'ev L.I. Physicochemical properties of the zinc-containing dusts of electric furnace steelmaking. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2013, vol. 2013, no. 7, pp. 507–512.

### Information about the authors:

*A.A. Alpatova, Senior Lecturer of the Chair "Metallurgy of Steel and Ferroalloys" (aakhilko01@mail.ru)*

*L.M. Simonyan, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metallurgy of Steel and Ferroalloys"*

*N.Sh. Isakova, Student*

Received October 27, 2015

УДК 669:504

## МОДЕЛЬ РАСЧЕТА КОНЦЕНТРАЦИИ ВТОРИЧНЫХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРЕ

**Орелкина Д.И.**, аспирант кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих  
промышленных технологий (darya.oryolkina@yandex.ru)

**Петелин А.Л.**, д.ф.-м.н., профессор кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих  
промышленных технологий (sasha@misis.ru)

**Полулях Л.А.**, доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих  
промышленных технологий

**Подгородецкий Г.С.**, к.т.н., доцент, зав. кафедрой энергоэффективных и ресурсосберегающих  
промышленных технологий

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

**Аннотация.** Предложена модель расчета пространственного распределения вторичных газовых выбросов во внешних зонах влияния металлургических предприятий, основанная на принципе максимальной опасности. Описаны основные факторы, определяющие максимальный риск превышения допустимой концентрации вторичного выброса: образующий фактор, фактор распространения выбросов и фактор падения концентрации. Приведены принципиальные отличия методов расчета распространения первичных и вторичных газовых выбросов. В том числе определено, что образование вторичного выброса происходит не от точечного источника, а во всей области пространства, в которой концентрация вещества первичного выброса превышает его фоновую концентрацию в атмосфере. Использование данных ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» и метода пространственно-распределенного источника позволило провести анализ поля концентрации вторичного выброса серной кислоты. Построены графики зависимостей концентрации  $H_2SO_4$  от удаленности от источника первичного выброса при различных скоростях ветра. Обнаружено, что функциональная зависимость концентрации  $H_2SO_4$  от расстояния имеет отчетливый максимум, положение которого и значение концентрации в котором можно определить для любой скорости ветра, зная среднюю мощность первичного выброса в течение заданного промежутка времени.

**Ключевые слова:** вторичные газовые выбросы, первичные газовые выбросы, выбросы предприятий черной металлургии, роза ветров, поле концентраций.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-5-300-305

Современные темпы промышленно-экономического развития сопровождаются, как правило, ростом загрязнения окружающей среды. Одними из крупнейших промышленных источников загрязнения воздушного бассейна являются предприятия черной металлургии [1]. С прошлого века и по настоящее время идет активная разработка моделей и программных приложений [2] по расчету распределения в атмосфере выбросов загрязняющих веществ. Наиболее высокие концентрации наблюдаются в воздухе городов (обычно они на 1–2 порядка больше, чем в сельской местности [3]), поэтому основные модели расчета распространения выбросов применимы к небольшим территориям, охватывающим город – промышленный центр и прилегающие районы. Одной из таких моделей, пользующейся популярностью в России, является система расчета ОНД-86 [4]. Однако оценки показывают, что вредные вещества распространяются на расстояния, превышающие сотни и даже тысячи километров [5]. Поэтому в данной работе рассматривается распространение выбросов вне промышленного центра, т. е. во внешней

зоне влияния предприятия. Имеющиеся модели так же не учитывают, что первичные выбросы, поступающие в атмосферу, являются прямыми предшественниками вторичных токсичных веществ, сильных летучих кислот. Распространение этих кислот, т. е. вторичных выбросов, зачастую опаснее, чем первичных.

Расчет интенсивности поступления кислот в атмосферу в том или ином регионе зависит от многих факторов. Среди них – удаленность и мощность источников выбросов, наличие в атмосфере катализирующих примесей, время года, условия атмосферного переноса и характер подстилающей поверхности. В силу многообразия и сложности параметров, влияющих на генерацию и перенос кислот, сделать детальное теоретическое описание процесса их распространения довольно непросто.

Для составления картины распределения вторичных выбросов в атмосфере необходимо знать исходные характеристики атмосферного воздуха в регионе, показывающие распределение вещества-предшественника от источника выбросов. В случае постоянно действующе-

го (стационарного) источника для анализа распределения вторичных выбросов в качестве исходных данных необходимо иметь стационарное во времени поле распределения концентраций первичных выбросов, зависящее от географии региона, рассматриваемого периода времени (месяца, времени года) и мощности выброса.

В работе [6] приведен пример расчета распространения газовых выбросов во внешней зоне влияния металлургического предприятия. В результате расчета получены карты-схемы распространения в регионе ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат» оксидов серы и азота – эти вещества относятся к первичным выбросам предприятия. Модель, использованная для расчета распространения первичных выбросов, основана на принципе максимальной опасности и учитывает несколько факторов, необходимых для оценки максимального риска процесса распространения выбросов. Первый образующий фактор, без которого не обходится ни один расчет, это количество выбросов за заданный промежуток времени. Второй фактор распространения выбросов – это ветровой и диффузионный перенос. Диффузия происходит всегда, но достаточно медленно, в сравнение с другими процессами массопереноса. Ветровой перенос отражает направленное перемещение газовых выбросов силой ветра, в отличие от диффузии, которая в отсутствие других причин создает симметричное по всем направлениям поле концентраций. Ветровая нагрузка распределена неравномерно как по направлению, так и во времени.

Следующий фактор, химический, это фактор падения концентрации, характеризующий интенсивность взаимодействия компонентов выбросов с компонентами атмосферы. Он, как и диффузия, будет действовать всегда: и в штиль, и в шторм компоненты выбросов непрерывно реагируют с компонентами окружающей среды.

Именно эти три фактора и определяют максимальный риск при распространении газовых выбросов. Увеличение количества параметров, описывающих процесс распространения выбросов, только снижает расчетный уровень концентрации вредных веществ в атмосфере, но при этом не дает реального значения концентрации. В то же время снижение рассчитанного значения уровня загрязнения хоть и приближает расчетные значения к реальным, но не отражает опасного уровня загрязнения, который может достигаться при определенных погодных и других условиях и угрожать здоровью людей.

В данной работе приведен метод расчета вторичных выбросов, основанный на принципе максимальной опасности. Как уже отмечалось, точный расчет принципиально невозможен и нецелесообразен. Поэтому в расчете учитываются те же факторы распространения и снижения концентрации, что и при расчете первичных выбросов: вещество распространяется за счет ветрового и диффузионного переноса; снижение концентрации осуществляется за счет химической активности ком-

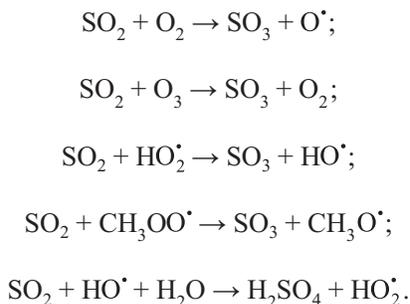
понента выброса с компонентами окружающей среды, осаждения, вымывания и пр. Однако есть несколько важных отличительных признаков, относящихся к процессу образования в атмосфере вторичных выбросов.

- Вещество первичного выброса поступает в атмосферу уже в готовом виде. А для образования в атмосфере любого компонента вторичного выброса необходимо нахождение в атмосфере вещества-предшественника: любой компонент вторичного выброса является продуктом реакции компонента первичного выброса с компонентами атмосферы. Таким образом, для проведения расчета образования и распределения вещества вторичного выброса необходимо иметь рассчитанное поле распределения (поле концентраций) первичного выброса – вещества-предшественника.
- Почему в качестве исходных данных мы нуждаемся не в количестве выброса первичного вещества, а в рассчитанном поле концентраций первичного выброса? Ответом на этот вопрос является второй признак расчета образования и распространения вторичных выбросов. В отличие от первичных выбросов, источником вторичных является не единый стационарный источник. Это область пространства, в которой концентрация вещества-предшественника (первичного выброса) превышает фоновую концентрацию в атмосфере. Распределение первичного выброса зависит от удаленности от самого предприятия и неоднородно по направлениям-радиусам вследствие розы ветров данного географического региона. Это важное отличие ставит задачу создания модели расчета распространения выброса от непрерывного пространственно-распределенного источника.

Решить задачу аналитически, т. е. создать систему уравнений, позволяющую по исходным данным конкретной точки пространства определить концентрацию в этой точке вторичного выброса, не представляется возможным. Однако современные технологии позволяют решить эту задачу с помощью программных продуктов, предназначенных для математических и технических вычислений.

Будем считать, что поле концентраций первичного выброса уже рассчитано. В частности, для ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК») это сделано в работе [7]. Используя поле концентраций первичного выброса  $SO_2$  для ОАО «ММК» за 2013 г., рассчитаем значения поля концентраций вторичного выброса, являющегося продуктом реакции оксида серы с окружающей средой.

Определим вещество, которое будем рассматривать в качестве вторичного выброса. Ниже приведены реакции  $SO_2$  с основными окислительными компонентами земной атмосферы [8]:



Видно, что вторичными выбросами являются  $\text{SO}_3$  и  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Однако образовавшийся при окислении триоксид с большой скоростью [9] превращается в серную кислоту по реакции



Время жизни триоксида составляет примерно  $10^{-5}$  с. В свою очередь, время жизни  $\text{H}_2\text{SO}_4$  оценивается величиной около 50 ч [10]. Поэтому примем допущение, что в результате химических реакций вся сера из диоксида переходит в кислоту. Общая скорость окисления  $\text{SO}_2$ , полученная эмпирическим путем, равна  $k_{\text{SO}_2} = 0,027 \text{ ч}^{-1}$  [11]. Эта же величина с учетом принятых допущений является скоростью образования кислоты.

В поле концентраций первичного выброса проведем 8 радиус-векторов из области, где расположено предприятие, как из центра 8 лучей, в соответствии с географическими направлениями розы ветров. Рассмотрим один из лучей. Разобьем его на мелкие участки длиной  $\Delta x$  каждый. Каждой  $i$ -й точке разбиения, расположенной на определенном расстоянии от центра, сопоставим концентрацию первичного выброса, соответствующую этому расстоянию  $C_{Ai}$  (здесь и далее индексами  $A$  и  $B$  обозначены первичные и вторичные выбросы соответственно). В начальный момент времени концентрация  $\text{SO}_2$  определяется средней мощностью выброса вещества в единицу времени  $m_A$ , мг/с, скоростью ветра  $v$ , м/с и площадью выноса выброса  $S$ , м<sup>2</sup>. Площадь выноса будем считать сечение ветрового коридора высотой  $h = 100$  м (высота трубы) и шириной  $\delta$  (диаметр предприятия), по которому вещество выброса поступает в воздушное пространство:

$$C_{A0} = \frac{m_A}{vS}. \quad (1)$$

Согласно работе [12], концентрация первичного выброса  $\text{SO}_2$  на расстоянии  $x$  от источника выбросов определяется по формуле

$$C_{Ai} = C_{A0} e^{-\frac{k_A + b_A x}{v}}, \quad (2)$$

где  $k_A$  – константа скорости окисления  $\text{SO}_2$  в атмосфере;  $b_A$  – величина, характеризующая диффузионный перенос. Согласно [12]  $b$  можно найти по формуле

$$b_A = \frac{2D}{\delta\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{\delta^2}{16Dt}}, \quad (3)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии  $\text{SO}_2$  в воздухе;  $t$  – время распространения первичного выброса, с.

В дальнейших расчетах величиной  $b_A$  можно пренебречь, так как она на несколько порядков меньше  $k_A$ .

Переходя от точки к точке (удаляясь от источника), количество  $\text{SO}_2$  будет изменяться (уменьшаться) на величину  $\Delta C_{Ai}$ :

$$\Delta C_{Ai} = C_{A(i-1)} - C_{Ai}. \quad (4)$$

Как уже говорилось выше, в результате химических реакций вся сера из диоксида  $\text{SO}_2$  переходит в кислоту  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , поэтому определить количество образовавшейся кислоты на промежутке, разделяющем точки  $(i-1)$  и  $i$ , можно по формуле

$$\Delta C_{Bi} = \Delta C_{Ai} \frac{M_B}{M_A}, \quad (5)$$

где  $M_A$  и  $M_B$  – молярные массы  $\text{SO}_2$  и  $\text{H}_2\text{SO}_4$  соответственно.

В любой точке  $i$  количество вторичного выброса  $\text{H}_2\text{SO}_4$  будет определяться величиной вещества  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , перешедшего из точки  $(i-1)$  в точку  $i$  под действием ветра. Удаляясь от источника выброса, количество этого вещества будет уменьшаться за счет химического фактора, аналогично процессу распространения первичных выбросов. Однако, согласно формулам (4), (5), в это же время в точке  $i$  образуется некоторое дополнительное количество кислоты  $\Delta C_{Bi}$ . Таким образом, величину вторичного выброса  $\text{H}_2\text{SO}_4$  в точке  $i$  можно рассчитать по формуле

$$C_{Bi} = C_{B(i-1)} e^{-\frac{k_B \Delta x}{v}} + \Delta C_{Bi}, \quad (6)$$

где  $k_B$  – константа скорости нейтрализации  $\text{H}_2\text{SO}_4$  в атмосфере;  $\Delta x$  – расстояние между точками  $i$  и  $(i-1)$ .

Для расчета вышеописанным методом необходимо использовать стандартные компьютерные программы, применяемые для решения математических задач типа Mathcad, MATLAB, Mathematica. Задача с таким алгоритмом решается даже с помощью Microsoft Excel.

В качестве примера на основе данных работ [13–15] рассмотрим распространение  $\text{H}_2\text{SO}_4$  вдоль одного из радиус-векторов во внешней зоне влияния ОАО «ММК» при скорости ветра 1 м/с. На гистограмме показано распределение вторичного выброса в зависимости от расстояния от источника первичного выброса (рис. 1). Черным обозначено количество образовавшейся кислоты в точке  $i$  за временной промежуток, разделяющий точки  $i$  и  $(i-1)$ . С увеличением расстояния от источника первичного выброса количество вторичного

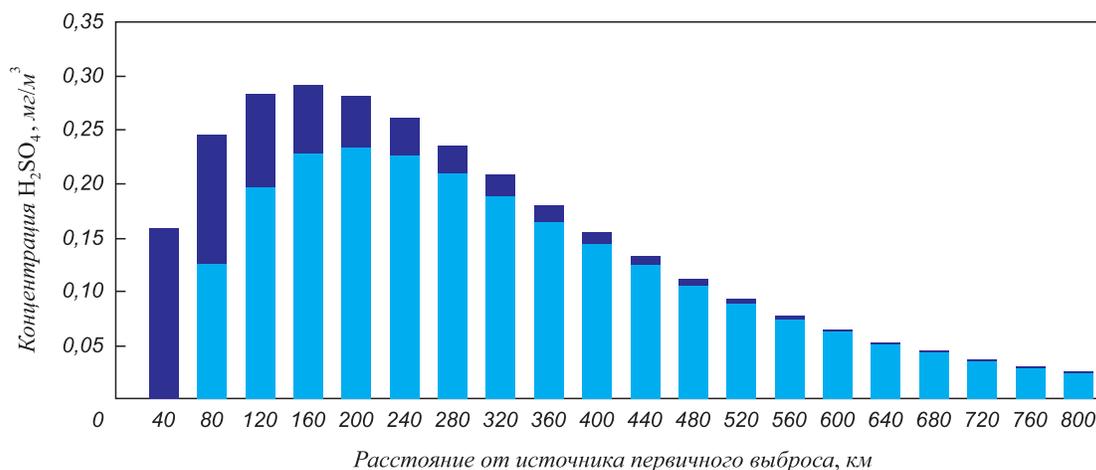


Рис. 1. Распределение вторичного выброса H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в зависимости от расстояния от источника первичного выброса при скорости ветра 1 м/с по данным ОАО «ММК» за 2013 г.

Fig. 1. Distribution of secondary H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> emission depending on the distance from the source of the primary emission at wind speed of 1 m/s according to the data of OJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works” in 2013

выброса, образующегося в каждой следующей точке, постепенно уменьшается, так как уменьшается количество компонента-предшественника. Серым цветом обозначено количество кислоты в точке  $i$ , перешедшей из точки  $(i - 1)$ . Видно, что количество вещества, перешедшего из предыдущей точки, уменьшилось. Это произошло за счет химического фактора.

Достаточно долгое время жизни кислоты в атмосферном воздухе и постоянный распределенный ее источник являются причинами накопления кислоты в воздухе. Концентрация вторичного выброса меняется от точки к точке и в определенный момент времени достигает максимума. На рис. 2 показано, что при увеличении скорости ветра максимум будет смещаться (удаляться) от источника первичного выброса. Значение концентрации H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в точке максимума с изменением скорости ветра так же будет меняться. Из графика видно, что при распространении кислоты наибольшей опасностью для населения, проживающего на расстояниях нескольких сотен километров от ОАО «ММК», являются погодные условия с незначительной средней скоростью ветра. Однако для населения, проживающего на больших расстояниях, опасность представляют как раз большие скорости ветра.

Поскольку изменение величины и положения максимума наблюдается при изменении скорости ветра, при этом для конкретного вещества (в данном случае H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) и предприятия остальные параметры, такие как количество выбросов, химическая активность и другие остаются неизменными, то можно рассчитать зависимость величины и расположения максимума от скорости ветра. Для ОАО «ММК» расстояние от источника до максимума концентрации составит  $s \approx 154\ 000v$ , м. Максимум концентрации H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> при заданной мощности выброса составит  $C_{B_{\max}} = 0,262/v$ , мг/м<sup>3</sup>. Можно выразить значение концентрации в максимуме через  $m_A$ ,

тогда будем иметь:  $C_{B_{\max}} = 5,29 \cdot 10^{-7} m_A/v$ , мг/м<sup>3</sup>. Последнюю формулу удобно использовать при изменении мощности выброса, например, при аварийном залповом выбросе SO<sub>2</sub>. Расчет может быть проведен оперативно, его результаты покажут максимально возможный риск превышения допустимой концентрации и установят место и время его появления.

Анализ распределения концентраций вторичных газовых выбросов может быть осуществлен вдоль любого из географических направлений региона расположения металлургического предприятия. Действительно, роза ветров для каждой местности содержит средние скорости ветра на любой заданный интервал времени в течение года для каждого из восьми радиус-векторов, соответствующих сторонам света. Таким образом, при

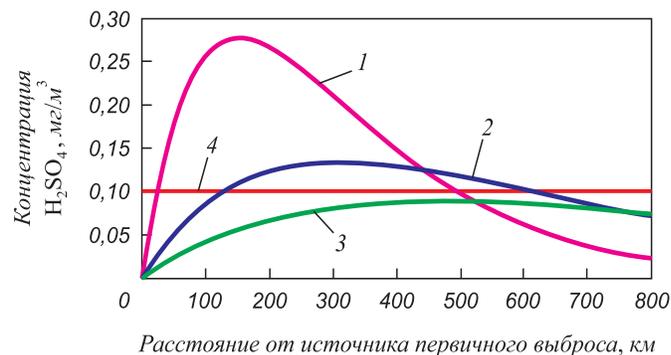


Рис. 2. Распределение вторичного выброса H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> в зависимости от расстояния от источника первичного выброса при скоростях ветра, м/с:

1 – 1; 2 – 2; 3 – 3 (4 – ПДК<sub>ср</sub> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) по данным ОАО «ММК» за 2013 г.

Fig. 2. Distribution of secondary H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> emission depending on the distance from the source of the primary emission at wind speeds, m/s: 1 – 1, 2 – 2, 3 – 3 (4 – MPC of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) according to the data of OJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works” in 2013

известной мощности первичного выброса с помощью информации, имеющейся в розе ветров, предлагаемая модель позволяет построить полное стационарное пространственное поле распределения концентраций вторичного выброса во внешней зоне влияния металлургического предприятия. Пример такого построения с наложением поля концентраций на географическую карту приведен в работе [7].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Варенков А.Н., Костиков В.И. Химическая экология и инженерная безопасность металлургических производств: Учебное пособие для вузов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2000. – 20 с.
2. Федосов А.А. Моделирование распространения выбросов вредных веществ в пограничном слое атмосферы // Теплоэнергетика. 2006. № 5. С. 34 – 40.
3. Юсфин Ю.С., Леонтьев Л.И., Черноусов М.П. Промышленность и окружающая среда. – М.: ИКЦ Академкнига, 2004. – 469 с.
4. ОНД – 86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л.: Гидрометеоздат, 1987. – 68 с.
5. Карабасов Ю.С., Чижикова В.М. Экология и управление природопользованием: Учебник для вузов. – М.: Изд. МИСиС, 2006. – 712 с.

6. Petelin A.L., Yusfin Yu.S., Orelkina D.I., Vishnyakova K.V. Predicting the risk of generalized air pollution by metallurgical enterprises // *Steel in Translation*. 2013. Vol. 43. No. 9. P. 539 – 543.
7. Orelkina D.I., Petelin A.L., Polulyakh L.A. Distribution of Secondary Gas Emissions around Steel Plants // *Steel in Translation*. 2015. Vol. 45. No. 11. P. 811 – 814.
8. Исидоров В.А. Экологическая химия: Учебное пособие для вузов. – СПб: Химиздат, 2001. – 304 с.
9. Филов В. А. Вредные вещества в окружающей среде. Элементы I – IV групп периодической системы и их неорганические соединения. – СПб: НПО «Профессионал», 2005. – 462 с.
10. Новиков З. Ю. Экология, окружающая среда и человек. – М.: Химиздат, 1998. – 316 с.
11. Гольданская Л.Ф. Химия окружающей среды. – М.: Мир, 2007. – 68 с.
12. Vishnyakova K.V., Petelin A.L., Yusphin Yu.S. Diffusion spreading of the emitted metallurgical gas // *Defectand diffusion forum*. 2011. Vol. 309 – 310. P. 239 – 242.
13. Социальный отчет за 2012 г. Открытое акционерное общество «Магнитогорский металлургический комбинат». [http://mmk.ru/about/responsibility/social\\_report/](http://mmk.ru/about/responsibility/social_report/) (дата обращения: 15.09.2015)
14. Научно-прикладной справочник «Климат России». <http://aisori.meteo.ru/ClspR> (дата обращения: 15.09.2015)
15. Квашин И.М. Предельно допустимые выбросы предприятий в атмосферу. Рассеивание и установление нормативов. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2008. – 26 с.

Поступила 30 марта 2016 г.

---

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 5, PP. 300–305.

---

### CALCULATION MODEL FOR THE CONCENTRATION OF SECONDARY METALLURGICAL EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE

*D.I. Orelkina, A.L. Petelin, L.A. Polulyakh, G.S. Podgorodetskii*

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

**Abstract.** The model for calculating the distribution of secondary gas emissions in the outer influence zone of metallurgical enterprises is proposed. The model is based on the principle of maximum danger. The main factors that determine the risk of exceeding the maximum allowable concentration of the secondary emissions are denoted. There are the forming factor, the distribution emissions factor and the concentration shrinkage factors. Fundamental differences of calculation methods of primary and secondary gas emissions were shown. There was also defined that the formation of secondary emission occurs in the volume of air space in which the concentration of primary emission exceeds its background concentration in the atmosphere. The analysis of the secondary emissions concentration as a function of the distance from OJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works” was built with the help of the spatially distributed source method. Graphs of the H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentration depending on the distance from the source of the primary emission were built at different wind speeds. It has been found that the function of the concentration dependence on distance has a distinct maximum which value can be determined for any wind speed, knowing the average power of the primary emissions for a specific time period.

**Keywords:** secondary gas emissions, primary gas emissions, steel plant emissions, wind patterns, concentration field.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-5-300-305

#### REFERENCES

1. Varenkov A.N., Kostikov V.I. *Khimicheskaya ekologiya i inzhenernaya bezopasnost' metallurgicheskikh proizvodstv. Uchebnoe*

*posobie dlya VUZov* [Chemical ecology and engineering safety of metallurgical production: Textbook for universities]. Moscow: Intermet Inzhenering, 2000, 20 p. (In Russ.).

2. Fedosov A.A. Simulation of pollutant dispersion in the boundary layer of the atmosphere. *Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika)*. 2006, vol. 53, no. 5, pp. 367–373.
3. Yusfin Yu.S., Leont'ev L.I., Chernousov M.P. *Promyshlennost' i okruzhayushchaya sreda* [Industry and environment]. Moscow: IKTS Akademkniga, 2004, 469 p. (In Russ.).
4. *OND – 86. Metodika rascheta kontsentratsii v atmosfernom vozdukhue vrednykh veshchestv, soderzhashchikhsya v vybrosakh predpriyatii* [OND 86. System for calculating the air concentrations of pollutants from industrial enterprises]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987. (In Russ.).
5. Karabasov Yu.S., Chizhikova V.M. *Ekologiya i upravlenie prirodopol'zovaniem, uchebnik dlya vuzov* [Ecology and environmental management, Textbook for universities]. Moscow: Izd. MISiS, 2006, 712 p. (In Russ.).
6. Petelin A.L., Yusfin Yu.S., Orelkina D.I., Vishnyakova K.V. Predicting the risk of generalized air pollution by metallurgical enterprises. *Steel in Translation*. 2013, vol. 43, no. 9, pp. 539–543.
7. Orelkina D.I., Petelin A.L., Polulyakh L.A., Distribution of secondary gas emissions around steel plants. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 11, pp. 811–814.
8. Isidorov V.A. *Ekologicheskaya khimiya: Uchebnoe posobie dlya vuzov* [Environmental Chemistry: A University Textbook]. St. Petersburg: Khimizdat, 2001, 304 p. (In Russ.).
9. Filov V.A. *Vrednye veshchestva v okruzhayushchei srede. Elementy I–IV grupp periodicheskoi sistemy i ikh neorganicheskie soedineniya* [Harmful substances in the environment. Elements of I–IV Groups of the periodic system and their inorganic compounds]. St. Petersburg: NPO “Professional”, 2005. 462 p. (In Russ.).

10. Novikov Z.Yu. *Ekologiya, okruzhayushchaya sreda i chelovek* [Ecology, environment and people]. Moscow: Khimizdat, 1998, 316 p. (In Russ.).
11. Gol'danskaya L.F. *Khimiya okruzhayushchei sredy* [Environmental chemistry]. Moscow: Mir, 2007, 68 p. (In Russ.).
12. Vishnyakova K.V., Petelin A.L., Yusphin Yu.S. Diffusion Spreading of the Emitted Metallurgical Gas. *Defectand Diffusion Forum*. 2011, vol. 309–310, pp. 239–242.
13. *Sotsial'nyi otchet za 2012 god. Otkrytoe aktsionernoe obshchestvo "Magnitogorskii metallurgicheskii kombinat"* [Social report of 2012. OJSC Magnitogorsk Iron and Steel Works]. Available at URL: [http://mmk.ru/about/responsibility/social\\_report/](http://mmk.ru/about/responsibility/social_report/) (In Russ.).
14. *Nauchno-prikladnoi spravochnik "Klimat Rossii"* [Climate of Russia, scientific applied handbook]. Available at URL: <http://aisori.meteo.ru/ClspR> (In Russ.).
15. Kvashnin I.M. *Predel'no dopustimye vybrosy predpriyatii v atmosfere. Rasseivanie i ustanovlenie normativov* [Maximum permissible

emissions of enterprises in the atmosphere. Dispersion and setting standards]. Moscow: AVOK-PRESS, 2008, 26 p. (In Russ.).

**Information about the authors:**

**D.I. Orelkina**, Postgraduate of the Chair "Energy-efficient and Resource-saving Industrial Technologies" (darya.oryolkina@yandex.ru)

**A.L. Petelin**, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Professor of the Chair "Energy-efficient and Resource-saving Industrial Technologies" (sasha@misis.ru)

**L.A. Polulyakh**, Assist. Professor of the Chair "Energy-efficient and Resource-saving Industrial Technologies"

**G.S. Podgorodetskii**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair "Energy-efficient and Resource-saving Industrial Technologies"

Received March 30, 2016

УДК 669(1+01+04+046.5+018.8+045.5+046.52)+669...8

## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАК ОСНОВА СОЗДАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТИ МЕТАЛЛУРГИИ.

### ЧАСТЬ 2. ПОРОШКОВЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ

*Леонтьев Л.И.*<sup>1,2,3</sup>, академик РАН, советник, д.т.н., профессор,  
главный научный сотрудник (lleontev@imet.ac.ru; leo@presidium.ras.ru)  
*Алымов М.И.*<sup>3,4</sup>, член-корр. РАН, д.т.н., профессор, директор ИСМАН

<sup>1</sup> Президиум РАН

(119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 32а)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

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

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

(119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 49)

<sup>4</sup> Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (ИСМАН)

(142432, Россия, Московская обл., Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 8)

**Аннотация.** Представлен обзор результатов исследований способов получения нанопорошков и консолидированных порошковых наноматериалов. Проанализированы особенности различных способов получения нанопорошков, приведены свойства нанопорошков. Рассмотрены методы консолидации нанопорошков прессованием, спеканием и спеканием под давлением. Приведены свойства консолидированных порошковых наноматериалов и рассмотрены перспективные области их применения в качестве конструкционных, функциональных и высокоэнергетических материалов.

**Ключевые слова:** порошковая металлургия, нанопорошки, дисперсность, производительность, консолидация, прочность, плотность, применение.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-5-306-313

Для получения объемных нанокристаллических материалов используют различные методы: консолидация нанопорошков, термическая и термомеханическая обработки сплавов, диспергирование структуры методом интенсивной пластической деформации, объемное модифицирование расплавов, нанокристаллизация аморфных сплавов, наноструктурирование поверхностных слоев и покрытий. Свойства объемных нанокристаллических материалов, т. е. объемных твердых тел с нанокристаллической структурой, значительно отличаются от свойств поликристаллических материалов с размером зерен более 1 мкм и монокристаллов.

#### Методы синтеза нанопорошков

Для получения объемных наноматериалов используют как нанопорошки (НП) с размером частиц менее 100 нм, так и наноструктурные порошки, размер частиц которых может быть больше 100 нм, но они имеют сложную структуру, состоящую из зерен нанометрового размера, а также аморфные порошки, которые управляемо кристаллизуются в процессе консолидации.

Свойства НП с размером частиц от 1 до 100 нм во многом определяются физико-химическими условия-

ми их синтеза [1]. Расширение областей применения НП требует изучения и развития методов их получения. К настоящему времени разработаны различные способы получения НП, которые будут рассмотрены ниже.

Общим принципом получения НП различными методами является сочетание высокой скорости образования центров зарождения частиц с малой скоростью их роста. Технические и конструкционные решения по созданию необходимых для этого условий могут быть различными. Гистограммы распределения частиц по размерам, их структура и свойства в значительной степени определяются условиями формирования частиц и, следовательно, зависят от методов их получения. Основные требования к методам получения НП заключаются в возможности контроля и управления параметрами процесса, узком распределении частиц по размерам, воспроизводимом получении порошков контролируемой дисперсности, химического и фазового состава.

Одни методы применимы для получения металлических порошков, другие более пригодны для получения оксидных порошков, третьи – для карбидных порошков. Одни методы малопродуктивны и при-

меняются в основном в лабораторных условиях для получения небольших количеств порошков, другие высокопроизводительны и применяются в промышленности. Одни методы применимы для тугоплавких соединений, другие – для легкоплавких материалов.

За последнее время накоплен большой опыт в разработке методов синтеза НП. В случае необходимости получения НП какого-то соединения можно выбрать наиболее подходящий из них.

Наряду с разработкой методов синтеза НП с узким распределением наночастиц по размерам, совершенствуются приемы разделения полученных наночастиц на достаточно монодисперсные фракции. Для этих целей используют контролируемое осаждение частиц, стабилизированных поверхностно-активными веществами, с последующим центрифугированием (первой осаждается наиболее крупная фракция).

На поверхности наночастицы имеются продукты ее взаимодействия с окружающей внешней средой, которые могут существенно влиять на свойства наночастицы. Поэтому методы получения НП неразрывно связаны со способами стабилизации (пассивации) наночастиц – в матрицах, капсулированием и др.

На производительность метода влияет конструкция и масштаб установки (лабораторная или промышленная). Подробное описание методов синтеза НП можно найти во многих монографиях и обзорах [2]. В работе [3] приведены результаты сравнения методов получения НП по производительности и качеству порошка. Качество порошка определяется его дисперсностью, наличием примесей и агломератов. Производительность метода, г/ч, это масса порошка, которую можно произвести на одной установке за 1 ч. На рисунке представлено соотношение между средним размером частиц и производительностью для различных способов синтеза нанопорошков.

Производительность методов получения НП уменьшается с увеличением требований к дисперсности порошка (малый средний размер частиц, узкое распределение частиц по размерам, низкое содержание примесей). Из способов, получивших промышленное применение, наибольшую производительность имеют методы синтеза оксидов. Методы получения металлических порошков менее производительны.

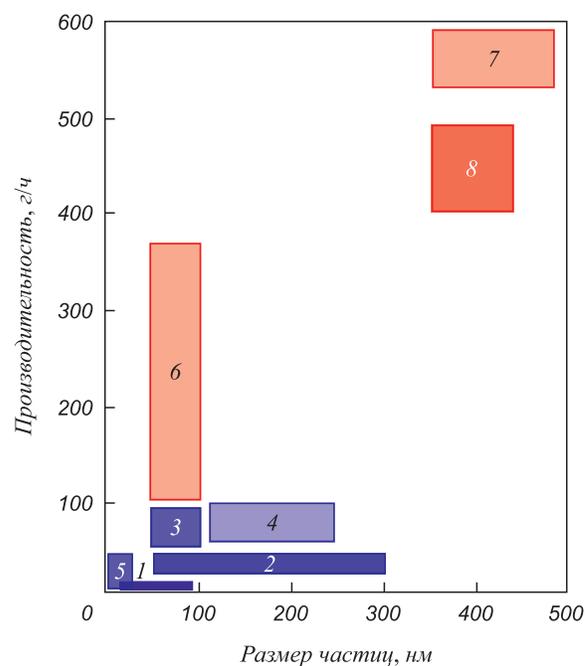
В первой части обзора [4] уже было сказано о перспективных способах получения нанопорошков. Однако следует отметить перспективный метод СВС, разработанный в Институте структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (ИСМАН).

В ИСМАН разработана СВС-технология синтеза порошков нитрида алюминия, которая позволяет получать порошки в широком диапазоне дисперсности. СВС-порошки нитрида алюминия успешно применяются для производства теплопроводящей диэлектрической керамики, теплопроводящих клеев и композитов. Благодаря высокой чистоте СВС-нитрида

алюминия по содержанию углерода, он используется для получения радиоактивного изотопа углерода  $C^{14}$ . При спекании порошка нитрида алюминия марки СВС-И получена керамика с теплопроводностью до 200 Вт/м·К. Разработана СВС-технология производства композиционного порошка на основе альфа модификации нитрида кремния, который включает в себя спекающую добавку – оксид магния. Разработанный композиционный порошок предназначен для получения конструкционной керамики, работающей в экстремальных условиях высоких температур и механических нагрузок. Керамика из композиционного СВС порошка  $Si_3N_4-MgO$ , полученная методом горячего прессования, имеет прочность на изгиб до 900 МПа и микротвердость до 18 ГПа [5 – 9].

### Консолидация нанопорошков

Для получения объемных наноматериалов из порошков в основном используют методы прессования при комнатной температуре с последующим спеканием или спекание под давлением.



Соотношение между средним размером частиц и производительностью для различных методов синтеза нанопорошков:

1 – метод испарения и конденсации; 2 – левитационно-струйный метод; 3, 6 – электрический взрыв проволоки; 4, 8 – плазмохимический метод; 5 – химико-металлургический метод; 7 – самораспространяющийся высокотемпературный синтез. Металлы (1 – 5), соединения металлов (оксиды, карбиды, нитриды) (6 – 8)

Relation between average particle size and productivity rate of corresponding technologies:

1 – vaporization-condensation technique, 2 – flowing gas evaporation technique, 3 and 6 – electrical explosion of wires, 4 and 9 – plasma chemical method, 5 – chemical metallurgical method, 7 – self-propagating high-temperature synthesis. Metals (1 – 5), compounds: oxides, carbides, nitrides (6 – 8)

### **Прессование нанопорошков**

Закономерности консолидации порошков с размером частиц более 1 мкм достаточно полно исследованы, но эти процессы имеют свои особенности. Среди основных проблем при консолидации нанопорошков можно выделить их высокую активность (например пирофорность металлических порошков), значительный рост зерен при спекании, агломерацию нанопорошков, наличие примесей, повышенную адгезию частиц, трудности при изготовлении длинномерных заготовок. Целью прессования является формирование высокоплотной и однородной по плотности заготовки, поскольку неоднородность плотности прессовки приводит к появлению дефектов в спеченном образце (в конечном изделии).

Результаты экспериментальных исследований показали, что нанопорошки уплотняются значительно труднее, чем порошки с размером частиц около микрона и более. Особенно резко давление прессования возрастает при размерах частиц менее 100 нм [2]. На диаграммах холодного прессования нанопорошков можно выделить стадии интенсивного и слабого уплотнения. На первой стадии происходит проскальзывание и перегруппировка частиц, а на второй – упругое сжатие частиц в местах контакта, пластическая деформация пластичных и разрушение хрупких частиц. Межчастичное (адгезионное) трение, а также трение частиц с матрицей оказывают значительное влияние на уплотнение нанопорошков при холодном прессовании. Вследствие значительного трения, скольжение и перегруппировка наночастиц затруднены, поэтому нанопорошки более склонны к образованию дефектов при прессовании, чем обычные порошки. Кроме того, наночастицы не содержат дислокаций, что затрудняет их пластическую деформацию, поэтому уменьшение размера частиц приводит к снижению плотности компактов при одинаковом давлении прессования. Вклад пластической деформации в уплотнение нанопорошков незначителен.

Прессовки с низкой плотностью не имеют достаточную прочность для технологической манипуляции с ними. Приложение высоких давлений приводит к появлению трещин расслаивания при дальнейшей обработке. Поэтому для получения прессовок с однородной плотностью необходимо определять оптимальные режимы прессования.

### **Спекание нанопорошков без давления**

При спекании происходит увеличение плотности пористого тела, обусловленное переносом вещества в область контакта частиц. Кроме таких механизмов спекания, как вязкое течение, зернограничная диффузия от границы раздела между частицами, объемная диффузия от границы раздела между частицами, поверхностная диффузия от поверхности частиц, объемная диффузия от поверхности частиц, перенос вещества через газовую (или жидкую) фазу, для наночастиц были предло-

жены и другие механизмы: поворот зерен и межчастичное проскальзывание [10].

При спекании происходит увеличение площади контакта между частицами и (при уплотнении) сближение их центров. Уплотнение прессовки эквивалентно исчезновению части объема, занятого порами. В такой постановке задача об определении кинетики спекания аналогична задаче о кинетике фазовых превращений. Был развит кинетический подход к анализу стадий и механизмов спекания нанопорошков. На основании исследований кинетики спекания нанопорошков показано, что этот процесс является многостадийным. Для спекания металлических нанопорошков в водороде можно выделить три стадии процесса спекания, характеризующиеся различными значениями энергии активации спекания  $Q$  и степенного фактора  $n$ . Первая стадия определяется механизмом вязкого течения, вторая стадия – поверхностной самодиффузией, третья стадия – зернограничной самодиффузией [2].

### **Спекание нанопорошков под давлением**

В Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН было отработано несколько технологий спекания нанопорошков под давлением, позволяющих получать объемные наноматериалы:

- осадка – спекание под давлением при повышенной температуре после восстановления металлических нанопорошков без контакта с воздухом;
- метод газовой экструзии, позволяющий получать длинномерные заготовки;
- горячее изостатическое прессование (ГИП).

Спекание под давлением позволяет получать беспористый материал при меньших температурах, чем спекание без давления [2]. Спекание нанопорошков под давлением приводит к интенсивному уплотнению при меньшем росте зерен, по сравнению со спеканием без давления. Повышение давления при горячем прессовании приводит к снижению температуры процесса и тем самым позволяет затормозить процесс рекристаллизации, что способствует сохранению наноструктуры. Поэтому спекание под давлением прессовок из нанопорошков дает возможность не только уплотнять прессовки до практически беспористого состояния, но и сохранить наноструктуру материалов. Гидростатическая составляющая приложенного давления приводит к уплотнению за счет пластической деформации (ползучести) и интенсификации диффузионных механизмов спекания. Сдвиговая (тангенциальная) составляющая приложенного давления приводит к перегруппировке частиц и схлопыванию пор. Перегруппировка частиц и деформация пор приводят к росту числа контактов между частицами. Сдвиговая компонента напряжений минимальна для ГИП и возрастает для квазиизостатического одноосного прессования в пресс-формах (горячее прессование), далее возрастает для одноосного прессования без пресс-форм

(осадка) и, наконец, – для экструзии [2]. Сдвиговые напряжения приводят к механическому разрушению оксидных слоев на поверхности частиц, что улучшает связь между частицами.

Прессование нанопорошков при повышенной температуре характеризуется уменьшением адсорбированных на поверхности частиц соединений (происходит очистка поверхности частиц, восстановление оксидов на их поверхности), что позволяет активизировать сцепление между частицами. Выбор температуры спекания ниже температуры рекристаллизации позволяет предотвратить рост зерен. Механизмом, определяющим уплотнение металлических нанопорошков (никеля, железа, меди, кобальта), является ползучесть, контролируемая зернограничной диффузией [11].

Для получения длинномерных цилиндрических заготовок разработана технология газовой экструзии. Метод газовой экструзии отличается от других методов обработки давлением тем, что обрабатываемый материал подвергается интенсивной пластической деформации выдавливанием (экструзии) в условиях высокого гидростатического давления инертного газа. В этом методе применяется локальный нагрев обрабатываемой заготовки в зоне очага деформации. При локальном нагреве обрабатываемый материал находится в зоне нагрева минимально необходимое время, что важно при консолидации нанопорошков, поскольку необходимо затормозить рост зерен. В результате обработки методом газовой экструзии материал приобретает форму тонкого стержня длиной до 1 м с точными размерами и гладкой поверхностью.

Из нанопорошков методом гидростатического прессования в эластичных оболочках изготавливали прессовки (с плотностью около 60 %), которые затем спекали (до плотности 90 %) и подвергали экструзии (уменьшение диаметра от 8 до 2 мм, со степенью деформации 90 %) до относительной плотности, близкой к теоретической плотности материала (99 %). Давление газа при экструзии держали в пределах 220 – 420 МПа. Никелевые образцы при этом деформировались при температурах 900 – 1000 °С со скоростями экструзии 0,4 – 0,5 мм/с, а железные образцы деформировались при температурах 700 – 800 °С со скоростями 3,0 – 3,5 мм/с [12, 13].

В работе [14] методом холодного изостатического прессования нанопорошка меди со средним размером частиц 50 нм при давлении 400 МПа получили заготовки с относительной плотностью 70 %, которые затем спекали при температуре 240 °С в водороде до относительной плотности 90 %. Окончательное уплотнение заготовки проводили методом гидростатической дифференциальной экструзии в капсуле при комнатой температуре и перепаде давления 400 МПа. Прямая экструзия (при атмосферном давлении после фильеры) приводила к разрушению образца внутри капсулы. Были получены образцы длиной 50 мм и диаметром

5 мм с относительной плотностью  $99 \pm 1$  % и размером зерен 140 – 150 нм.

Метод СВС позволяет получать длинномерные изделия с наноразмерной структурой из композиционных керамических материалов, содержащих износостойкую составляющую ( $\text{TiC}$ ,  $\text{TiB}_2$ ) и оксидную эвтектику ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--ZrO}_2$ ) [14, 15].

### Свойства консолидированных наноматериалов

В статье А. Гриффитса 1920 г. [16] впервые предсказана возможность значительно увеличить прочность за счет уменьшения размера зерна: «Можно поднять точку предела текучести материала путем его «измельчения», пока не будет достигнута теоретическая прочность». За прошедшие годы были проведены экспериментальные исследования механических свойств полученных наноматериалов при различных статических и циклических условиях нагружения: растяжение, сжатие, микротвердость [17 – 19]. Причем следует отметить, что испытания были проведены на образцах с гостированными размерами, а не на микрообразцах, что важно для сравнения со свойствами крупнозернистых аналогов.

Механические свойства наноматериалов выше, чем свойства крупнозернистых аналогов: возрастают предел текучести, предел прочности, ударная вязкость при сохранении пластичности на достаточно высоком уровне. Например, для никеля прочность возрастает в 1,5 – 2,0 раза при сохранении пластичности на достаточно высоком уровне 15 – 20 %. Результаты данной работы подтверждаются результатами исследований наноматериалов, полученных другими методами. Однако термическая стабильность свойств порошковых наноматериалов выше, чем термическая стабильность свойств аналогичных наноматериалов, полученных другими способами [20].

Результаты работы определили перспективные области применения консолидированных наноматериалов:

- повышение твердости в 5 – 7 раз используется при создании твердых сплавов, например на основе карбида вольфрама [21, 22] и других композиционных материалов [23];
- повышение прочности в 1,5 – 2,0 раза позволяет использовать наноматериалы в качестве конструкционных материалов, например, в медицине [24, 25];
- формуемость нанокерамики на уровне титановых сплавов позволяет изготавливать из керамических нанопорошков изделия сложной формы [25, 26];
- функциональные применения наноматериалов – износостойкие нанокристаллические покрытия, оптически прозрачная керамика, фильтры [27], катализаторы [28], электроды для нанесения покрытий [29].

В настоящее время ведутся масштабные исследования по созданию новых типов высокоплотных энергетических материалов [30, 31]. При этом наибольшее внимание уделяется различным типам механохимически активных (реакционноспособных) композиционных материалов, называемых в США реактивными материалами (ReactiveMaterial – RM), в особенности высокоплотным РМ (High-DensityRM).

Основной способ получения композитов – перемешивание полимерного порошка с наполнителями и последующее плавление образованной системы. Поскольку для политетрафторэтилена (ПТФЭ) характерна высокая вязкость расплава, то добиться хорошей гомогенности системы и исключить агломерацию наполнителей таким способом сложно. Другой подход получения композитов с участием фторполимерного порошков состоит в механоактивационной обработке смеси полимерного порошка и металлического порошка в планетарных мельницах, позволивший получить металлические частицы, капсулированные фторполимерной оболочкой [32]. По сложившейся зарубежной терминологии, реактивные материалы – это композиция двух и более твердых веществ, в которой при высокоскоростном воздействии может быть инициирована экзотермическая химическая реакция. Другими видами активно изучаемых реактивных материалов являются: термитные смеси типа «металл – оксид металла» (нотермиты); интерметаллические соединения, СВС-реакции в которых протекают с образованием алюминидов, боридов и карбидов; метастабильные межмолекулярные композиты, матричные материалы и гидриды, в том числе производимые с использованием нанотехнологий. Их основные преимущества – это большая запасенная энергия (в единице массы и/или объема) и более рациональное использование энергии, чем в случае применения обычных энергетических материалов. В отличие от классических подходов к использованию энергетических материалов, основанных на установившихся режимах реакции, например в форме детонации или послойного горения, концепция реактивных материалов принципиально подразумевает связь скорости и типа реакции с условиями удара. При этом эффект действия реактивных материалов может меняться в широком диапазоне [33 – 41].

Перспективным направлением использования углеродсодержащих наноразмерных наполнителей является разработка высоконаполненных 3D-армированных гибридных нанокомпозитов на их основе, что позволит существенно улучшить физико-механические характеристики полимерных композиционных материалов и придать им необходимые функциональные свойства, необходимые для конструктивных авиационных материалов [42].

Разработка и внедрение конструктивных и функциональных наноматериалов позволит снизить материалоемкости и энергоемкости производства, по-

высить надежность, долговечность эксплуатационные параметры и потребительские свойства оборудования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основы нанотехнологии / Н.Т. Кузнецов, В.М. Новоторцев, В.А. Жабрев, В.И. Марголин В.И. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 397 с.
2. Алымов М.И. Порошковая металлургия нанокристаллических материалов. – М.: Наука, 2007. – 169 с.
3. Алымов М.И., Шустов В.С., Устюхин А.С., Евстратов Е.В. Соотношение между качеством нанопорошков и производительностью методов их получения // Композиты и наноструктуры. 2012. № 3. С. 5 – 9.
4. Леонтьев Л.И., Григорович К.В., Костина В.М. Фундаментальные исследования как основа создания новых материалов и технологий в области металлургии. Часть 1 // Изв. вуз. Черная Металлургия. 2016. № 1. С. 11 – 22.
5. Закожевский В.В., Боровинская И.П. Синтез субмикронных частиц AlN в режиме горения // Неорганические материалы. 2015. Т. 51. № 6. С. 1 – 6.
6. Чевыкалова Л.А., Келина И.Ю., Михальчик И.Л. и др. Керамический материал на основе отечественных композиционных порошков нитрида кремния, полученных методом СВС // Новые огнеупоры. 2014. № 10. С. 31 – 36.
7. Borovinskaya I.P., Ignat'eva T.I., Semenova V.N., Chemagina E.A. Aluminum oxynitride by SHS in chemical furnace // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. 2015. Vol. 24. No. 3. P. 142 – 147.
8. Боровинская И.П., Барина Т.В., Игнат'ева Т.И. СВС ультратонких порошков СВС Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Влияние добавок неорганических и органических соединений на микроструктуру, морфологию и фазовый состав продуктов // Российские нанотехнологии. 2015. Т. 10. № 9 – 10. С. 74 – 83.
9. Mukasyan A.S., Rogachev A.S., Aruna S.T. Combustion synthesis in nanostructured reactive systems // Advanced Powder Technology. 2015. No. 26(3). P. 954 – 976.
10. Nanostructured materials: processing, properties and potential applications / Edited by Carl C. Koch. USA, Noyes Publications, 2002. – 612 p.
11. Hayashi K., Eto H. Pressure-Sintering of iron, cobalt, nickel and copper ultrafine powders and the crystal grain size and hardness of the compacts // J. Japan Inst. Metals. 1989. Vol. 53. No. 2. P. 221 – 226.
12. Бербенцев В.Д., Алымов М.И., Бедов С.С. Консолидация нанопорошков методом газовой экструзии // Российские нанотехнологии. 2007. № 7 – 8. С. 116 – 120.
13. Ваганов В.Е., Аборкин А.В., Алымов М.И., Бербенцев В.Д. Современное состояние и перспективы развития высокотемпературной газовой экструзии для получения прутков тонкого сечения труднодеформируемых сплавов, в том числе в наноструктурированном состоянии. Металлы. 2015. № 5. С. 67 – 74.
14. Langlois C., Hytch M.J., Langlois P. etc. Synthesis and microstructure of bulk nanocrystalline copper // Metallurgical and Materials Transactions A. 2005. Vol. 36A. P. 3451 – 3460.
15. Бажин П.М., Столин А.М., Алымов М.И., Чижиков А.П. Особенности получения длинномерных изделий из керамического материала с наноразмерной структурой методом СВС-экструзии // Перспективные материалы. 2014. № 11. С. 73 – 80.
16. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids // Phil. Trans. Roy. Soc. (London). 1921. A221. P.163 – 198.
17. Lashmore D.S., Jesser W.A., Schladitz D.M. etc. Microstructural investigation of polycrystalline iron whiskers // J. Appl. Phys. 1977. Vol. 48. P. 478 – 481.
18. Лякишев Н.П., Алымов М.И. Получение и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов. – М.: ЭЛИЗ, 2007. – 148 с.

19. Солнцев К.А. ИМЕТ РАН: развитие работ в области наноматериалов и нанотехнологий // Нанотехнологии. Экология. Производство. 2010. № 4. С. 4 – 6.
20. Andrievski R.A., Khatchoyan A.V. Nanomaterials in extreme environments. Fundamentals and applications // Springer Series in Materials Science. 2016. Vol. 230.
21. Цветков Ю.В., Самохин А.В., Николаев А.В. Плазменные процессы в металлургии и обработке материалов. – В кн.: Институт металлургии и материаловедения им. А.А.Байкова РАН – 75 лет: Сб. науч. тр. / Под ред. К.А. Солнцева. – М.: Интерконтакт Наука, 2013. С. 512 – 528.
22. Zaitsev A.A., Vershinnikov V.I., Konyashin I. etc. Cemented carbides from WC powders obtained by the SHS method // Materials Letters. 2015. Vol. 158. No. 1. P. 329 – 332.
23. Щербakov В.А., Грядунov А.Н., Сачкова Н.В., Самохин А.В. СВС-компактирование керамических композитов на основе боридов титана и хрома // Письма о материалах. 2015. Т. 5. Вып. 1. С. 20 – 23.
24. Алымov М.И., Евстратов Е.В., Анкудинов А.Б. и др. Получение, структура и свойства пористых материалов на основе титана // Физика и химия обработки материалов. 2015. № 12. С. 70 – 75.
25. Алымov М.И., Бакунова Н.В., Баринov С.М. и др. Особенности уплотнения при прессовании нанопорошков гидроксиапатита // Российские нанотехнологии. 2011. № 5 – 6. С. 50 – 52.
26. Mukasyan A. S., Lin Ya-Cheng, Rogachev A. S., Moskovskikh D.O. Direct combustion synthesis of silicon carbide nanopowder from the elements // Journal of the American ceramic society. 2013. Vol. 96. Issue 1. P. 111 – 117.
27. Kurchatov I.M., Lagutsov N.I., Uvarov V.I., Kurchatova O.V. Asymmetric gas transport: composite porous ceramic membranes // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10. No. 20. P. 40939 – 40945.
28. Shevchenko V.Ya., Mackay A.L. Geometrical principles of the self-assembly of nanoparticles // Glass physics & Chemistry. 2008. Vol. 34. No. 1. P. 8 – 15.
29. Зайцев А.А., Сентюрина Ж.А., Погожев Ю.С. и др. Получение литых электродов из наномодифицированного высокобористого сплава на основе алюминид никеля для изготовления сферических гранул методом центробежного распыления // Изв. вуз. Цветная металлургия. 2015. № 4. С. 15 – 24.
30. Ударно-волновой синтез в твердых смесях / С.А. Зелепугин, А.Ю. Долгобородов, О.В. Иванова, А.С. Зелепугин. – Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2012. – 230 с.
31. Имховик Н.А., Селиванов В.В., Симонов А.К. и др. Об исследованиях по разработке за рубежом новых высокоплотных реактивных материалов («High-Density Reactive Materials») и их применению в боеприпасах повышенного могущества действия // Вооружение и экономика. 2014. № 1 (26). С. 53 – 63.
32. Ультрадисперсные и наноразмерные порошки: создание, строение, производство и применение / Под ред. акад. В.М. Бузника. – Томск: Изд-во НТЛ, 2009. – 192 с.
33. Advanced Energetic Materials. Committee on Advanced Energetic Materials and Manufacturing Technologies. National Research Council. 2004.
34. Ames R.G. A standardized evaluation technique for reactive warhead fragments // 23-rd International Symposium on Ballistics. – Tarragona, Spain. 16 – 20 April, 2007.
35. Wang Haifu, Liu Zongwei, Wang Hui, Yu Weiming. Impact initiated characteristics of reactive material fragments // Proceedings of the 2007 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics. – Xi'an, Shaanxi, China. October 23 – 26, 2007.
36. Rosencrantz S.D. Characterization and modeling methodology of polytetrafluoroethylene based reactive materials for the development of parametric models. Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Engineering, B.S., University of Washington, 1998. Wright State University, 2007.
37. Mr. Steven Nicolich Chief, Presented by: Dr. Rao Surapaneni, Energetic materials to meet warfighter requirements: An overview of selected US Army RDECOM-ARDEC Energetic Materials Programs // Proceedings of the 42nd Annual Armament Systems: Gun and Missile Systems Conference, 2007.
38. Daniels A., Baker E., Ng K. A unitary demolition warhead // Mines, demolition and non-lethal weapons conference, 2003.
39. Gotzmer C., Amato B., Kim S. Applications overview of reactive materials // National Capital Region Energetics Symposium, La Plata, MD, April 27 – 28, 2009.
40. Zhang F., Donahue L., Wilson W.H. The Effect of charge reactive structural metal cases on air blast. 14th IDS, 2010.
41. Bless S., Russell R., Pantoya M. Advanced energetic materials for agent defeat: Impact-driven reactions in biocidal reactive materials for WMD applications. Annual Progress Report -HDTRA1-08-1-0013, 2009.
42. Каблов Е.Н., Кондрашов С.В., Юрков Г.Ю. Перспективы использования углеродсодержащих наночастиц в связующих для полимерных композиционных материалов // Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8. № 3 – 4. С. 24 – 42.

Поступила 9 марта 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 5, pp. 306–313.

## FUNDAMENTAL INVESTIGATIONS AS THE BASIS OF CREATION OF NEW MATERIALS AND TECHNOLOGIES IN METALLURGY. PART 2. POWDER NANOMATERIALS

L.I. Leont'ev<sup>1,2,3</sup>, M.I. Alymov<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Scientific Council on Metallurgy and Metal Science of Russian Academy of Sciences (Department of Chemistry and Material Sciences), Moscow, Russia

<sup>2</sup>National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS), Moscow, Russia

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

<sup>4</sup>Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science, Russian Academy of Sciences (ISMAN), Chernogolovka, Moscow Region, Russia

**Abstract.** The paper presents a review of the investigation results in the field of nanopowder and consolidated powder nanomaterials. The features of the various powder fabrication methods are described and

analyzed, as well as the produced nanopowders properties. The different methods of nanopowder consolidation (consolidation, sintering, sintering under pressure) are considered. The properties of such consolidated nanomaterials are listed and some perspective directions of their usage (as the engineering, functional and high-energetic materials) are pointed out.

**Keywords:** powder metallurgy, nanopowders, dispersivity, productivity, consolidation, strength, density, application.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-5-306-313

## REFERENCES

1. Kuznetsov N.T., Novotortsev V.M., Zhabrev V.A., Margolin V.I. *Osnovy nanotekhnologii* [Basics of nanotechnology]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2014, 397 p. (In Russ.).

2. Alymov M.I. *Poroshkovaya metallurgiya nanokristallicheskikh materialov* [Powder metallurgy of nanocrystalline materials]. Moscow: Nauka, 2007, 169 p. (In Russ.).
3. Alymov M.I., Shustov V.S., Ustyukhin A.S., Evstratov E.V. Correlation between the quality of nanopowders and productivity rate for fabrication technology of them. *Kompozity i nanostruktury*. 2012, no. 3, pp. 5–9. (In Russ.).
4. Leont'ev L.I., Grigorovich K.V., Kostina V.M. Fundamental investigations as the basis of creation of new materials and technologies in metallurgy. Part 1. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 1, pp. 11–22. (In Russ.).
5. Zakorzhevskii V.V., Borovinskaya I.P. Combustion Synthesis of Submicron AlN Particles. *Inorganic Materials*. 2015, vol. 51, pp. 566–571.
6. Chevykalova L.A., Kelina I.Yu., Mikhali'chik I.L., Plyasunkova L.A., Arakcheev A.V., Zakorzhevskii V.V., Loryan V.E. Ceramic material on the base of domestic silicon nitride composite powders obtained by self-propagating high-temperature suspension (SHS) method. *Novye ognepuory*. 2014, no. 10, pp. 31–36. (In Russ.).
7. Borovinskaya I.P., Ignat'eva T.I., Semenova V.N., E. A. Chema-gina E.A. Aluminum oxynitride by SHS in chemical furnace. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*. 2015, vol. 24, no. 3, pp. 142–147.
8. Borovinskaya I.P., Barinova T.V., Ignat'eva T.I. SHS of ultrafine and nanosized Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> powders. Influence of inorganic and organic additives on product microstructure, morphology and phase composition. *Nanotechnologies in Russia*. 2015, vol. 10, Issue 9, pp. 763–776.
9. Mukasyan A.S., Rogachev A.S., Aruna S.T. Combustion synthesis in nanostructured reactive systems. *Advanced Powder Technology*. 2015, vol. 26, Issue 3, pp. 954–976.
10. *Nanostructured materials: processing, properties and potential applications*. Koch Carl C. ed. Norwich, NY: Noyes Publications, 2002, 612 p.
11. Hayashi K., Eto H. Pressure-Sintering of iron, cobalt, nickel and copper ultrafine powders and the crystal grain size and hardness of the compacts. *J. Japan Inst. Metals*. 1989, vol. 53, no. 2, pp. 221–226.
12. Berbentsev V.D., Alymov M.I., Bedov S.S. Nanopowder consolidation by gas extrusion method. *Rossiiskie nanotekhnologii*. 2007, no. 7–8, pp. 116–120. (In Russ.).
13. Vaganov V.E., Aborkin A.V., Alymov M.I., Berbentsev V.D. State of the Art and the Prospects of High-Temperature Gas Extrusion to Produce Thin-section Rods Made of Hard-to-Deform, Including Nanostructured, Alloys. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2015, no. 9, pp. 732–738.
14. Langlois C., Hytch M.J., Langlois P., Lartigue-Korinek S., and Champion Y. Synthesis and microstructure of bulk nanocrystalline copper. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2005, vol. 36A, pp. 3451–3460.
15. Bazhin P.M., Stolin A.M., Alymov M.I., Chizhikov A.P. Peculiarities of the production of elongated items from a ceramic material with nanoscale structure by the SHS extrusion method. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2015, vol. 6, no. 2, pp. 187–192.
16. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil. Trans. Roy. Soc. (London)*. 1921, A221, pp. 163–198.
17. Lashmore D.S., Jesser W.A., Schladitz D.M., Schladitz H.J., Wilsdorf H.G.F. Microstructural investigation of polycrystalline iron whiskers. *J. Appl. Phys.* 1977, vol. 48, pp. 478–481.
18. Lyakishev N.P., Alymov M.I. *Poluchenie i fiziko-mekhanicheskie svoystva ob'emnykh nanokristallicheskikh materialov* [Production and physic-mechanical properties of bulk nanocrystalline materials]. Moscow: ELIZ. 2007, 148 p. (In Russ.).
19. Solntsev K.A. IMET of RAS: investigations in nanomaterials and nanotechnologies. *Nanotechnologies. Ecology. Production*. 2010, no. 4, pp. 4–6.
20. Andrievski R.A., Khatchoyan A.V. *Nanomaterials in extreme environments. Fundamentals and applications*. Springer Series in Materials Science, 2016, vol. 230.
21. Tsvetkov Yu.V., Samokhin A.V., Nikolaev A.V. Plasma processes in metallurgy and material treatment. In: *Institut metallurgii i materialovedeniya im. A.A. Baikova RAN – 75 let. Sb. nauchnykh trudov* [Institute metallurgy and material science A.A. Baikov RAS – 75 years. Proc.]. Solntsev K.A. ed. Moscow: Interkontakt Nauka, 2013, 792, pp. 512–528. (In Russ.).
22. Zaitsev A.A., Vershinnikov V.I., Konyashin I., Levashov E.A., Borovinskaya I.P., Ries B. Cemented carbides from WC powders obtained by the SHS method. *Materials Letters*. 2015, vol. 158, no. 1, pp. 329–332.
23. Shcherbakov V.A., Gryadunov A.N., Sachkova N.V., Samokhin A.V. Combustion synthesis of composites based on titanium and chromium borides. *Pis'ma o materialakh*. 2015, vol. 5, Issue 1, pp. 20–23. (In Russ.).
24. Alymov M.I., Evstratov E.V., Ankudinov A.B., Zelenskii V.A., Golosova O.A., Kolobova A.Yu. Preparation, structure and properties of the porous materials based on titanium. *FKhOM*. 2015, no. 12, pp. 70–75. (In Russ.).
25. Alymov M.I., Bakunova N.V., Barinov S.M., Belunik I.A., Fomin A.S., Ievlev V.M., Soldatenko S.A. Specific features of the densification of hydroxyapatite nanopowders upon pressing. *Nanotechnologies in Russia*. 2011, vol. 6, Issue 5–6, pp. 353–356.
26. Mukasyan A.S., Lin Ya-Cheng, Rogachev A.S., Moskovskikh D.O. Direct combustion synthesis of silicon carbide nanopowder from the elements. *Journal of the American ceramic society*. 2013, vol. 96, Issue 1, pp. 111–117.
27. Kurchatov I.M., Laguntsov N.I., Uvarov V.I., Kurchatova O.V. Asymmetric gas transport: composite porous ceramic membranes. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015, vol. 10, no. 20, pp. 40939–40945.
28. Shevchenko V.Ya., Mackay A.L. Geometrical principles of the self-assembly of nanoparticles. *Glass physics & Chemistry*. 2008, vol. 34, no. 1, pp. 8–15.
29. Zaitsev A.A., Sentyurina Zh.A., Pogozhev Yu.S., Levashov E.A., Sanin V.N., Yukhvid V.I., Andreev D.E., Mikhailov M.A., Kaplanskii Yu.Yu. Fabrication of cast electrodes from nanomodified nickel aluminide-based high-boron alloy to fabricate spherical powders using the plasma rotating electrode process. *Izvestiya VUZov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2015, no. 4, pp. 15–24. (In Russ.).
30. Zelepugin S.A., Dolgoborodov A.Yu., Ivanova O.V., Zelepugin A.S. *Udarno-volnovoi sintez v tverdykh smesyakh. Monografiya* [Shock-wave sintering in solid mixtures. Monograph]. Tomsk: Izd-vo Instituta optiki atmosfery SO RAN, 2012, 230 p. (In Russ.).
31. Imkhovik N.A., Selivanov V.V., Simonov A.K., Sergeeva A.I., Yashin V.B. About the abroad development research of new “High-Density Reactive Materials” and its appliance in high-lethality ammunition. *Vooruzhenie i ekonomika*. 2014, no. 1 (26), pp. 53–63. (In Russ.).
32. *Ul'tradispnsnye i nanorazmernye poroshki: sozdanie, stroenie, proizvodstvo i primenenie* [Ultrafine and nanosized powders: synthesis, structure, production and application]. Buznik V.M. ed. Tomsk: Izd-vo NTL, 2009, 192 p. (In Russ.).
33. Advanced Energetic Materials. Committee on Advanced Energetic Materials and Manufacturing Technologies. *National Research Council*. 2004.
34. Ames R.G. A standardized evaluation technique for reactive war-head fragments. *Proceedings of the 23-rd International Symposium on Ballistics*, Tarragona, Spain, 16–20 April, 2007.
35. Wang Haifu, Liu Zongwei, Wang Hui, Yu Weiming. Impact initiated characteristics of reactive material fragments. *Proceedings of the 2007 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics*. Xi'an, Shaanxi, China, October 23–26, 2007.
36. Rosencrantz S.D. *Characterization and modeling methodology of polytetrafluoroethylene based reactive materials for the development*

- of parametric models*. Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Engineering, B.S., University of Washington, 1998. Wright State University, 2007.
37. Mr. Steven Nicolich Chief, Presented by: Dr. Rao Surapaneni, Energetic materials to meet warfighter requirements: An overview of selected US Army RDECOM-ARDEC Energetic Materials Programs. *The Proceedings of the 42nd Annual Armament Systems: Gun and Missile Systems Conference*, 2007.
  38. Daniels A., Baker E., Ng K. A unitary demolition warhead. *Mines, demolition and non-lethal weapons conference*, 2003.
  39. Gotzmer C., Amato B., Kim S. Applications overview of reactive materials. *National Capital Region Energetics Symposium*, La Plata, MD, April 27–28, 2009.
  40. Zhang F., Donahue L., Wilson W.H. The Effect of charge reactive structural metal cases on air blast. *14th IDS*, 2010.
  41. Bless S., Russell R., Pantoya M. Advanced energetic materials for agent defeat: Impact-driven reactions in biocidal reactive materials for WMD applications. *Annual Progress Report – HD-TRAI-08-1-0013*, 2009.
  42. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Yurkov G.Yu. Prospective applications of carbon-containing nanoparticles in binders for polymer composite materials. *Nanotechnologies in Russia*. 2013, vol. 8, no. 3–4, pp. 163–185.

**Information about the authors:**

**L.I. Leont'ev**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician, Adviser of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher  
(l1eontev@imet.ac.ru)

**M.I. Alymov**, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of ISMAN

Received March 9, 2016

УДК 622.775:669.74.087.7

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА МАРГАНЦА ИЗ ОЧИЩЕННЫХ РАСТВОРОВ ПОСЛЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МАРГАНЕЦСОДЕРЖАЩЕГО ШЛАМА

*Абдыкирова Г.Ж., к.т.н., ведущий научный сотрудник (abdgul@mail.ru)*

*Танекеева М.Ш., научный сотрудник*

*Сыдыков А.Е., ведущий инженер*

*Дюсенова С.Б., инженер*

АО «Центр наук о Земле, металлургии и обогащения»  
(050010, Казахстан, Алматы, ул. Шевченко, 29/133)

**Аннотация.** Проведены исследования по получению электролитического диоксида марганца (ЭДМ) из очищенных растворов после выщелачивания марганецсодержащего шлама. Определено влияние анодной плотности тока на электролиз марганецсодержащих растворов. Выполнены исследования по предварительной очистке марганецсодержащих растворов перед электролизом. Проведение очистки раствора при pH 6,5 – 7,0 обеспечивает максимальное осаждение всех вредных для электролиза примесей: меди, цинка, никеля, кобальта, алюминия, фосфора, мышьяка, сурьмы, железа (III) и железа (II). После осаждения примесей пульпа фильтруется, гидратный осадок промывается, отфильтрованная жидкая фаза направляется на электролиз для получения ЭДМ. Образцы ЭДМ изучены с помощью рентгенофлуоресцентного, рентгенофазового анализов и растровой электронной микроскопии. Результаты показали, что ЭДМ, полученный в лабораторных условиях при анодной плотности в интервале  $I_a = 150 - 200 \text{ A/m}^2$ , отвечает всем требованиям, предъявляемым к высокоактивному продукту: массовая доля основной составляющей –  $\text{MnO}_2$  в опытах равна 95,0 – 96,5 %.

**Ключевые слова:** марганецсодержащий раствор, выщелачивание, примеси, очистка раствора, осаждение, электролит, электролиз, электролитический диоксид марганца.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-5-314-317

Самой важной неметаллургической областью применения марганца в форме его диоксида является производство химических источников тока (ХИТ), на которое приходится 200 – 250 тыс. т марганца в год [1 – 4]. Около 90 % электролитического диоксида марганца (ЭДМ) потребляется в электродах марганцевых аккумуляторных батарей, имеющих широкое применение в военной и космической промышленности. Сокращение запасов богатых руд и возросшие масштабы производства ХИТ обусловили необходимость разработки процессов электросинтеза активной двуокиси марганца, в которых в качестве исходного могло бы использоваться техногенное сырье [5 – 7].

Диоксид марганца имеет несколько модификаций:  $\alpha\text{-MnO}_2$  – криптомелан,  $\beta\text{-MnO}_2$  – пиролюзит и  $\gamma\text{-MnO}_2$  – рамсделит, которые можно получать, изменяя способ образования  $\text{MnO}_2$ . Эти модификации различаются окислительными потенциалами. Наиболее активной является  $\gamma$ -модификация, которая в зависимости от условий имеет крупнокристаллическую или дисперсную форму. Активность  $\text{MnO}_2$  не зависит от количества содержащегося в нем основного вещества, а главным образом от физико-химического состояния – неупорядоченности решетки, содержания гидратной влаги, дисперсности и т. д.

Наиболее традиционным методом переработки марганецсодержащего сырья можно считать способ с использованием восстановительного обжига с последующим выщелачиванием, позволяющий осуществить селективный переход марганца в раствор и решить основную проблему – отделение марганца от фосфора. При этом образующийся кек может служить сырьем для получения недорогих строительных материалов. Однако при выщелачивании в раствор переходит некоторое количество железа, которое обуславливает необходимость введения операции железоочистки при переработке [8 – 11].

Проведен рентгенофлуоресцентный анализ ЭДМ на рентгенофлуоресцентном волнодисперсионном спектрометре Axios фирмы Panalytical (Голландия). Обработка спектрограмм проводилась с помощью программного обеспечения Super Q (Omnian 37). Проведен анализ ЭДМ с применением растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) на электронно-зондовом микроанализаторе JXA-8230 фирмы JEOL. Выполнен рентгенофазовый анализ проб ЭДМ на аппарате D8 Advance (Bruker), излучение  $\alpha - \text{Cu}$ , напряжение на трубке 40/40.

Проведены исследования по электролизу растворов после выщелачивания марганецсодержащего

шлама. Шлам предварительно обжигали при температуре 850 °С в присутствии угля. Полученный после обжига огарок содержал, % (по массе): 26,55 Mn; 3,5 Fe. Выщелачивание огарка осуществляли растворами серной кислоты с концентрацией 250 г/дм<sup>3</sup> при соотношении Т:Ж = 1:4, температуре 80 °С и продолжительности 60 мин [12]. Марганецсодержащие растворы после выщелачивания направляли на очистку от примесей.

Для удаления примеси железа обычно применяется его окисление и последующая гидролитическая очистка путем создания определенного рН осаждения. При этом сульфаты железа, тяжелых цветных металлов и алюминия, присутствующие в растворе, гидролизуются и дают осадок гидроксидов. Окисление двухвалентного железа можно осуществлять, используя высшие соединения марганца, кислород воздуха и соединения меди. При этом получают кристаллические осадки гидроокиси и основных сульфатов железа, которые сравнительно легко фильтруются.

Повышение рН в процессе нейтрализации приводит не только к гидролитическому осаждению ряда примесей, но и к коагуляции кремниевой кислоты, т. е. переводу золя в гель и укрупнению коллоидных частиц.

Очистку от примесей осуществляли гидролитическим способом с использованием раствора аммиака в присутствии окислителя. Опыты по осаждению примесей из сульфатных марганецсодержащих растворов проводили в термостатированном стакане при температуре 90 – 95 °С и механическом перемешивании со скоростью 500 об/мин. Проведение гидролитической очистки при рН 6,5 – 7,0 обеспечивает максимальное осаждение всех вредных для электролиза примесей: меди, никеля, кобальта, цинка, алюминия, железа (III) и железа (II). Присутствие объемного осадка гидроксида железа (III) позволяет провести окончательную доочистку от примесей за счет развитой поверхности гидроксида железа.

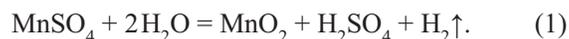
После осаждения примесей суспензия фильтруется, шлам промывается, а полученная жидкая фаза перерабатывается с выделением ЭДМ. Данные опытов по осаж-

дению примесей из сульфатных марганецсодержащих растворов в зависимости от рН раствора приведены в табл. 1. Очищенный раствор после отделения гидратного осадка направляли на электролиз для получения ЭДМ.

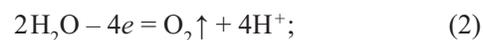
Исследования по электролитическому получению ЭДМ из очищенных растворов после выщелачивания проводили в бездиафрагменном электролизере. В качестве катода применяли сталь ЭИ-943, в качестве анода – титановую пластину. В электролизную ванну помещали три анода и два катода, межэлектродное расстояние составляло 5 мм. Температуру электролита контролировали термометром и поддерживали в интервале 95 – 99 °С. Перемешивание в электролизной ванне осуществлялось за счет конвективных потоков и выделяющихся электролизных газов.

Электролит готовили из сернокислого раствора после выщелачивания марганецсодержащего огарка. Постоянный уровень электролита поддерживали добавкой дистиллированной воды. Для предотвращения испарения поверхность электролита закрывали слоем расплавленного парафина толщиной ~ 5 мм.

В основе осаждения MnO<sub>2</sub> из сернокислых растворов лежит суммарная реакция анодного окисления ионов Mn (II):



На характер образовавшихся соединений оказывают влияние рН электролита, потенциал электрода, присутствие кислорода воздуха и растворенного кислорода. Отсутствие диафрагмы при получении диоксида марганца обуславливает некоторое отличие в режиме электролиза, которое выражается в сильном подкислении электролита за счет образующейся на аноде кислоты:



Для поддержания оптимального для анодного процесса рН избыток H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> необходимо нейтрализовать

Таблица 1

Данные опытов по осаждению примесей

Table 1. Experimental data on the deposition of impurities

Растворы	Содержание металлов, г/дм <sup>3</sup>									
	Mn	Fe	Cu	Zn	Al	Ni	Co	P	As	Sb
Исходный	33,2	9,47	0,007	0,19	2,80	0,018	0,016	0,022	0,001	0,011
рН 4,0	33,1	1,43	0,002	0,05	0,67	0,006	0,005	0,013	0,001	0,004
рН 5,0	33,0	0,09	0,0017	0,009	0,08	0,003	0,007	0,006	0,003	0,003
рН 6,0	32,8	0,003	0,0010	0,005	0,01	0,001	0,005	0,003	0,001	0,002
рН 7,0	32,5	0,001	0,0008	0,003	<0,01	0,0009	0,0008	<0,001	<0,001	0,002

непрерывным введением раствора аммиака. В результате окисления на аноде образуется диоксид марганца, на катоде выделяется водород. При 18 °С нормальный потенциал окисления  $Mn^{2+} \rightarrow Mn^{3+}$  равен +1,511 В, а для  $Mn^{3+} \rightarrow Mn^{4+}$   $E_0 = 1,642$  В, т. е. на аноде наиболее легко образуется Mn [13, 14].

Существуют в основном две точки зрения на механизм электролитического образования диоксида марганца [15]. Согласно первой точке зрения первичным продуктом окисления на аноде является марганцевая кислота, которая затем уже окисляет марганец (II) в марганец (IV). Сторонники второй точки зрения утверждают, что первичным процессом окисления  $Mn^{2+}$  является  $Mn^{3+}$ , который затем окисляется в  $Mn^{4+}$ .

Для определения влияния анодной плотности тока на качество ЭДМ процесс электролиза проводили при следующих значениях плотности тока:  $I_a = 150$  А/м<sup>2</sup> в опыте № 1 и  $I_a = 200$  А/м<sup>2</sup> в опыте № 2. В электролите создавали концентрацию свободной серной кислоты 20 г/дм<sup>3</sup>. Концентрация серной кислоты в отработанном электролите 40,5 г/дм<sup>3</sup>. Пробы исходного и отработанных электролитов после опытов сдавали на химический анализ. Результаты химического анализа продуктивных растворов электролиза приведены в табл. 2.

Эффективность электролиза определяли по следующим показателям: качеству ЭДМ, выходу ЭДМ по току, напряжению на ванне.

После электролиза отделенные от анодов куски ЭДМ измельчали и отмывали горячей водой от ионов  $SO_4^{2-}$ . Отмывка  $MnO_2$  от серной кислоты сложна из-за большой адсорбционной способности диоксида марганца. Полученные образцы ЭДМ сдавали на рентгенофлуоресцентный и рентгенофазовый анализы, а также растровую электронную микроскопию.

Результаты рентгенофлуоресцентного анализа показали, что содержание марганца в ЭДМ соответствует нормативным показателям и составляет 59,668 % Mn для опыта № 1 и 60,938 % Mn для опыта № 2 (или 95 и 96,5 %  $MnO_2$ ). Данные энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС-анализа) показали, что в исследуемой пробе ЭДМ содержится 60 % Mn или 95 %  $MnO_2$ .

По результатам рентгенофазового анализа образцы ЭДМ из разных опытов идентифицируются как рамс-

деллит, т. е.  $\gamma$ -модификация  $MnO_2$ , которая является пригодной для производства химических источников тока.

В проведенных опытах по электролизу ЭДМ при плотностях анодного тока 150 – 200 А/м<sup>2</sup> получены следующие электрохимические характеристики: напряжение на ванне не превышает 2,2 – 3,0 В, выход по току 65 – 68 %, расход электроэнергии 1,33 – 1,80 кВт·ч/кг.

**Выводы.** Таким образом, результаты проведенных исследований по электролизу сульфатных марганецсодержащих растворов показали, что ЭДМ, полученный в лабораторных условиях при анодной плотности в интервале  $I_a = 150 - 200$  А/м<sup>2</sup>, отвечает всем требованиям, предъявляемым к высокоактивному продукту: массовая доля основной составляющей –  $MnO_2$  составляет в опытах 95,0 – 96,5 %. Образцы ЭДМ, изученные с помощью рентгенофлуоресцентного, рентгенофазового анализов и растровой электронной микроскопии, идентифицируются как рамсделлит, т. е.  $\gamma$ -модификация  $MnO_2$ , которая является пригодной для производства химических источников тока.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2193527 Россия. Способ получения диоксида марганца / В.В. Патрушев, Ю.С. Кононов, С.В. Останова; опубл. 27.11.2002.
2. Пат. 2141009 Россия. Способ получения электролитического диоксида марганца / С.К. Аникин, Б.И. Васильев, Н.П. Васильев и др.; опубл. 10.11.1999.
3. Пат. 2105828 Россия. Способ получения электролитического диоксида марганца / В.Я. Семенов, В.А. Говорин, А.В. Кашевский и др.; опубл. 27.02.1998.
4. Lu J., Dreisinger D., Glück T. Manganese electrodeposition – a literature review // Hydrometallurgy. 2014. Vol. 144. P. 105 – 116.
5. Карелин В.Г., Зайнуллин Л.А., Артов Д.А., Епишин А.Ю. Перспективы эффективного вовлечения в крупномасштабное производство высококачественного железорудного, марганцевого и других видов минерального сырья месторождений Республики Казахстан // Горный журнал Казахстана. 2013. № 9. С. 21 – 27.
6. Чантурия В.А., Козлов А.П. Развитие физико-химических основ и разработка инновационных технологий глубокой переработки техногенного минерального сырья // Горный журнал. 2014. № 7. С. 79 – 84.
7. Чантурия В.А., Козлов А.П., Матвеева Т.Н., Лавриненко А.А. Инновационные технологии и процессы извлечения ценных компонентов из нетрадиционного труднообогатимого мине-

Таблица 2

#### Результаты химического анализа продуктивных растворов

Table 2. Results of chemical analysis of productive fluids

Растворы	Содержание металлов, г/дм <sup>3</sup>									
	Mn	Fe	Cu	Zn	Ni	Co	Al	P	As	Sb
Исходный электролит	30,2	0,005	н/о	0,015	0,002	0,003	н/о	0,003	0,0004	0,0004
Отработанный электролит № 1	1,85	0,019	н/о	0,014	0,002	0,0029	н/о	н/о	0,0002	0,0002
Отработанный электролит № 2	1,70	0,057	н/о	0,014	0,009	0,0006	н/о	н/о	0,0002	0,0003

- рального сырья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 5. С. 144–156.
8. Пат. 2444575 Россия. Способ получения диоксида марганца / А.Н. Серегин, В.М. Ермолов, Д.Ю. Жуков; опубл. 10.03.2012.
  9. Пат. 2441086 Россия. Способ переработки марганцевых руд / А.Г. Мустафин, В.И. Левашова, В.Н. Майстренко; опубл. 23.12.2010.
  10. Пат. 2176679 Россия. Способ извлечения марганца из марганцевых руд / Я.М. Абдрашитов, Ю.К. Дмитриев, Н.В. Захарова; опубл. 10.12.2001.
  11. Пат. 2175991 Россия. Способ переработки марганцевых руд / А.И. Павлов, И.А. Сорокин, С.В. Шишов, И.В. Шишова; опубл. 20.11.2001.
  12. Абдыкирова Г.Ж., Танекеева М.Ш., Морозова Ю.П. и др. Исследование восстановительного выщелачивания техногенного марганецосодержащего сырья // Комплексное использование минерального сырья. 2013. № 4. С. 25–31.
  13. Зарецкий С.А., Антоновская З.И. Электрохимия марганца. – Тбилиси: Мецниереба, 1967. Т. 3. – 232 с.
  14. Зауташвили Л.А., Агладзе Р.И., Ванидзе К.Ш. Электрохимия марганца. – Тбилиси: Мецниереба, 1976. Т. 6. С. 159–163.
  15. Зарецкий С.А. Электрохимическая технология неорганических веществ и химические источники тока. – М.: Высшая школа, 1980. – 423 с.

Поступила 24 июня 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. No. 5, pp. 314–317.

## ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF PRODUCING OF ELECTROLYTIC MANGANESE DIOXIDE FROM THE PURIFIED SOLUTIONS AFTER MANGANESE-SLUDGE LEACHING

G.Zh. Abdykirova, M.Sh. Tanekeeva, A.E. Sydykov,  
S.B. Dyusenova

JSC “Center of the Earth Sciences, Metallurgy and Enrichment”,  
Almaty, Republic of Kazakhstan

**Abstract.** Studies on the production of electrolytic manganese dioxide (EMD) from purified solutions after leaching of manganese sludge were held. The effect of anode current density on electrolysis manganese sulphate solutions is determined. The analysis of pre-treatment of manganese solutions before electrolysis was made. Conducting cleaning solution at pH 6,5–7,0 provides maximum deposition of impurities harmful to electrolysis of copper, zinc, nickel, cobalt, aluminum, phosphorus, arsenic, antimony, iron (III) and iron (II). After the deposition of impurities sludge is filtered, hydrate precipitate is washed, filtered liquid phase is sent to electrolysis to produce EDM. The EDM samples were examined using X-ray fluorescence, X-ray diffraction and scanning electron microscopy. The results showed that the EDM obtained under the laboratory conditions at an anodic current density in the range of  $I_a = 150–200 \text{ A/m}^2$ , meets all the requirements for high-level product: mass fraction of the main component –  $\text{MnO}_2$  is 95–96,5 % at the experiments.

**Keywords:** manganese solution, leaching, impurities, deposition, electrolysis, electrolyte, electrolytic manganese dioxide.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-5-314-317

### REFERENCES

1. Patrushev V.V., Kononov Yu.S., Ostanova S.V. *Sposob polucheniya dioksida margantsa* [Method of manganese dioxide producing]. Patent RF no. 2193527, publ. 27.11.2002. (In Russ.).
2. Anikin S.K., Vasil'ev B.I., Vasil'ev N.P., Kireev S.G., Kulikov N.K., Mukhin V.M., Romanchuk E.V. *Sposob polucheniya elektroliticheskogo dioksida margantsa* [Method of producing of electrolytic manganese dioxide]. Patent RF no. 2141009, publ. 10.11.1999. (In Russ.).
3. Semenov V.Ya., Govorin V.A., Kashevskii A.V., Litvinenko V.G., Gorbunov V.A. *Sposob polucheniya elektroliticheskogo dioksida margantsa* [Method of producing of electrolytic manganese dioxide]. Patent RF no. 2105828, publ. 27.02.1998. (In Russ.).
4. Jianming Lu, David Dreisinger, Thomas Glück. Manganese electro-deposition – a literature review. *Hydrometallurgy*, 2014, vol. 144, pp. 105–116.
5. Karelin V.G., Zainullin L.A., Artov D.A., Epishin A.Yu. Prospects of effective involvement in large scale production of high-quality iron ore, manganese and other minerals of the Republic of Kazakhstan. *Gornyi zhurnal Kazakhstana*. 2013, no. 9, pp. 21–27. (In Russ.).
6. Chanturiya V.A., Kozlov A.P. Development of physical-chemical basis and working out of innovation technologies of deep processing of anthropogenic mineral raw materials. *Gornyi zhurnal*. 2014, no. 7, pp. 79–84. (In Russ.).
7. Chanturiya V.A., Kozlov A.P., Matveeva T.N., Lavrinenko A.A. Innovative technologies and processes of extract valuable components from non-traditional hard concentrability minerals. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2012, no. 5, pp. 144–156. (In Russ.).
8. Seregin A.N., Ermolov V.M., Zhukov D.Yu. *Sposob polucheniya dioksida margantsa* [The process for manganese dioxide producing]. Patent RF no. 2444575, publ. 10.03.2012. (In Russ.).
9. Mustafin A.G., Levashova V.I., Maistrenko V.N. *Sposob pererabotki margantsevykh rud* [Method for processing of manganese ores]. Patent RF no. 2441086, publ. 23.12.2010. (In Russ.).
10. Abdrashitov Ya.M., Dmitriev Yu.K., Zakharova N.V. *Sposob izvlecheniya margantsa iz margantsevykh rud* [The method of extraction of manganese from manganese ores]. Patent RF no. 2176679, publ. 10.12.2001. (In Russ.).
11. Pavlov A.I.; Sorokin I.A.; Shishov S.V.; Shishova I.V. *Sposob pererabotki margantsevykh rud* [Method for processing of manganese ores]. Patent RF no. 2175991, publ. 20.11.2001. (In Russ.).
12. Abdykirova G.Zh., Tanekeeva M.Sh., Morozova Yu.P., Telkov Sh.A., Toilanbai G.A., Sydykov A.E., Eshpanova G.T. Research of restorative leaching of manganese technogenic raw materials. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya*. 2013, no. 4, pp. 25–31. (In Russ.).
13. Zaretskii S.A., Antonovskaya Z.I. *Elektrokhimiya margantsa* [Electrochemistry of manganese], vol. 3. Tbilisi: Metsniereba, 1967, 232 p. (In Russ.).
14. Zautashvili L.A., Agladze R.I., Vanidze K.Sh. *Elektrokhimiya margantsa* [Electrochemistry of manganese], vol. 6. Tbilisi: Metsniereba, 1976, pp. 159–163. (In Russ.).
15. Zaretskii S.A. *Elektrokhimicheskaya tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv i khimicheskie istochniki toka* [Electrochemical technology of inorganic substances and chemical sources of electricity]. Moscow: Vysshaya shkola, 1980, 423 p. (In Russ.).

### Information about the authors:

G.Zh. Abdykirova, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher  
(abdgul@mail.ru)  
M.Sh. Tanekeeva, Research Associate  
A.E. Sydykov, Senior Engineer  
S.B. Dyusenova, Engineer

Received June 24, 2015

УДК 621.31

## АНАЛИЗ ПОЛУЧАЕМОГО ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ПЕРЕПЛАВЕ РАСХОДУЕМЫХ ЭЛЕКТРОДОВ В ВАКУУМНОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ

*Бородин А.А.<sup>1</sup>, магистрант*

*Кабулова Е.Г.<sup>2</sup>, к.т.н., доцент, зав. кафедрой высшей математики*

*Положенцев К.А.<sup>2,3</sup>, старший мастер по ремонту цеха КИПиА,*

*аспирант (kirill.polozhentsev@gmail.com)*

<sup>1</sup> **Московский государственный машиностроительный университет**

(107023, Россия, Москва, ул. Б. Семеновская, 38)

<sup>2</sup> **Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова, филиал НИТУ МИСиС**

(309516, Россия, Белгородская обл., Старый Оскол, микрорайон Макаренко, 42)

<sup>3</sup> **ОАО «Металлургический завод «Электросталь»**

(144002, Россия, Электросталь, Московская обл., ул. Железнодорожная, 1)

**Аннотация.** Предложены способы определения отклонений технологического процесса вакуумного дугового переплава. На вакуумной дуговой печи устанавливаются видеокамеры для контроля процессом переплава. Системы автоматизированного управления переплавом обычно измеряют только нужные для непосредственного управления величины, по которым в ряде случаев невозможно определить возникновение специфических ненормальных режимов плавки. Однако сталевар по изображению с видеокамер способен определить и устранить их. Получаемое изображение разбивается на кадры. Каждый кадр – это матрица, состоящая из пикселей. Используя сумму пикселей получаемого изображения, можно определить ненормальные режимы переплава. В работе предлагаются алгоритмы обработки видеозображений для обнаружения ненормальных режимов плавки.

**Ключевые слова:** вакуумная дуговая печь, видеокамера, ионизация, короткая дуга, яркость изображения, матрица пикселей, скорость изменения яркости изображения, сумма пикселей, вектор-строка, видеозображение, слиток, расходный электрод.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-5-318-321

Вакуумная дуговая печь – электрическая печь для плавки металлов в вакууме энергией электрической дуги. Печь применяется для переплава металла в вакууме для улучшения свойств и чистоты получаемого в процессе переплава слитка (рис. 1).

С другой стороны вакуумная дуговая печь – газоразрядная система, где электрическая дуга существует на поверхности переплавляемого металла и получаемого слитка 2. Переплавляемый электрической дугой металл называют электродом 1. Он крепится к подвижному механическому штоку 4. Для вертикального перемещения штока с зажатым электродом печь имеет электродвигатель постоянного тока 3. При подаче постоянного тока между электродом (катод) и кристаллизатором (анод) возникает электрическая дуга. Выделяющееся тепло расплавляет электрод, жидкий металл стекает в кристаллизатор 5, образуя слиток.

В соответствии с существующей технологией электрод при переплаве должен поддерживаться на высоте 10 – 20 мм над расплавом.

На вакуумной дуговой печи для наблюдения за процессом переплава установлены видеокамеры в соответствии с рис. 2.

Вакуумная камера состоит из верхней части 1 и нижней части (кристаллизатор) 2. Во время наведения «жидкой» ванны происходит начало наплавления слитка 3. При переплаве расходного электрода 4 увеличивается уровень наплавленного слитка. Перемещая шток 5 с расходным электродом, производится регулирование межэлектродного расстояния. С помощью видеокамер 6 снимается видеозображение процесса переплава и передается обработчику изображений.

Опытный сталевар по видеозображению, получаемому с видеокамер, может определить, что происходит с процессом переплава в данный момент внутри печи. В видеозображении содержится необходимая информация для того, чтобы производить переплав в вакуумных дуговых печах.

В данной работе рассмотрен способ определения ионизации короткой дуги и затягивание шлаком «жидкой» ванны металла с помощью получаемого изображения с видеокамер.

Способ построен на определении яркости получаемого изображения. Как известно, каждое изображение состоит из пикселей разного цвета. Пиксель по своей структуре представляет совокупность трех цветов:

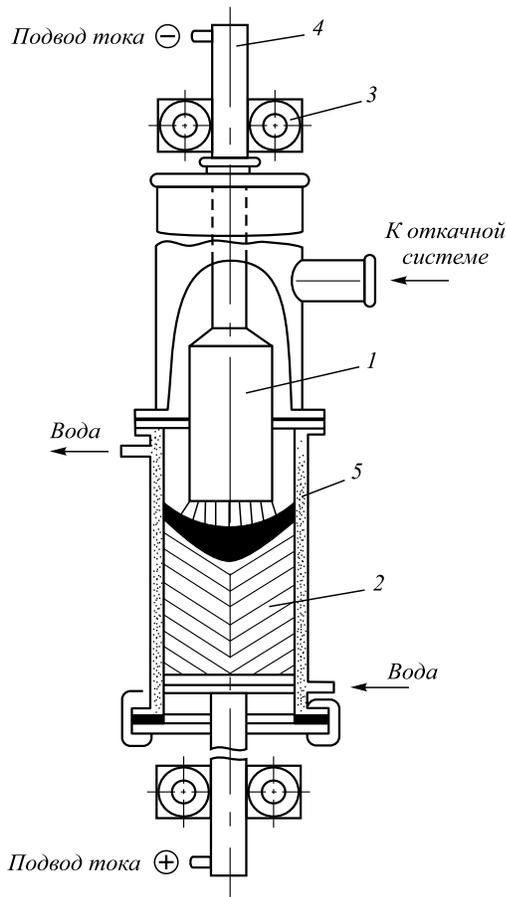


Рис. 1. Схема дуговой вакуумной электропечи с кристаллизатором

Fig. 1. Scheme of the vacuum arc furnace

красного, синего и зеленого, а так же значение яркости, итого четыре переменные. С другой стороны, пиксель является вектор-строкой, состоящей из четырех чисел, следовательно сумма четырех чисел дает значение, которое и определяет пиксель. Цветовой диапазон строится следующим образом: пиксель черного цвета имеет наименьшую сумму четырех чисел, которая стремится к нулю, и наоборот, сумма чисел будет максимальной, если пиксель имеет белый цвет.

Каждое получаемое видеоизображение состоит из 24 кадров, а кадр представляет собою матрицу пикселей, равную размерам получаемого изображения. В свою очередь матрица пикселей представляет матрицу чисел, где каждое число – это сумма всех значений каждого вектора строки.

Сумму всех пикселей кадра запишем в следующем виде:

$$Z(t) = \sum_{q=0}^n \sum_{w=0}^m M_{q,w}(t), \quad (1)$$

где  $Z(t)$  – сумма всех пикселей кадра в текущий момент времени;  $n, m$  – размеры получаемого кадра согласно разрешению матрицы видеокамеры;  $M_{q,w}$  – матрица пикселей кадра.

Скорость изменения суммы всех пикселей кадра:

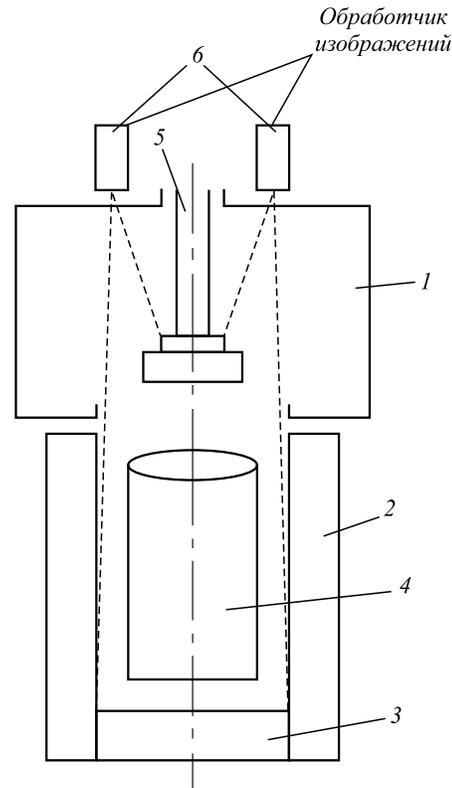


Рис. 2. Схема расположения видеокамер на вакуумной дуговой печи

Fig. 2. Scheme of the video cameras location on the vacuum arc furnace

$$v_{\text{изо}}(t) = \frac{Z(t) - Z(t - \Delta t_{\text{изо}})}{\Delta t_{\text{изо}}}, \quad (2)$$

где  $Z(t - \Delta t_{\text{изо}})$  – сумма всех пикселей за прошедший момент времени;  $\Delta t_{\text{изо}}$  – время приращения, с.

Фильтрованное значение скорости изменения суммы всех пикселей кадра  $v_{\text{изоф}}(t)$ :

$$T \dot{v}_{\text{изоф}} + v_{\text{изоф}}(t) = v_{\text{изо}}(t). \quad (3)$$

Производная  $\dot{v}_{\text{изоф}}$  рассчитывается неявным способом.

Ускорение изменения суммы всех пикселей кадра:

$$a_{\text{изо}}(t) = \frac{v_{\text{изоф}}(t) - v_{\text{изоф}}(t - \Delta t_{\text{изоф}})}{\Delta t_{\text{изоф}}}, \quad (4)$$

где  $v_{\text{изоф}}(t - \Delta t_{\text{изоф}})$  – фильтрованное значение скорости изменения суммы всех пикселей кадра за прошедший момент времени;  $\Delta t_{\text{изоф}}$  – время приращения, с.

Исследуя кадры, получаемые с видеокамер, можно сделать следующие выводы:

- если переплав идет на короткой дуге, то изображение на кадре начинает затухать согласно изображению, представленному в соответствии с рис. 3, 4;
- появление такого негативного явления как ионизация сопровождается кратковременными вспыш-

ками света, которые освещают кристаллизатор, слиток и расходимый электрод, а затем начинают гаснуть в соответствии с изображением, представленном на рис. 4.

Если значение переменной  $v_{\text{изо}}(t)$  начинает удовлетворять условию  $v_{\text{изоф}}(t) < v_{\text{крит}}$  дольше 3 с, где  $v_{\text{крит}}$  – критическая скорость изменения суммы всех пикселей кадра, вычисленная опытным путем, то это свидетельствует о том, что имеет место короткая дуга. В этом случае сигнал с обработчика изображения поступает на регулятор печи, который начинает медленно растягивать дугу, пока значение  $v_{\text{изоф}}(t)$  не будет удовлетворять условию  $v_{\text{изоф}}(t) > 0$ , а затем продолжает переплав по заданной программе.

Если же переменная  $a_{\text{изо}}(t)$  скачкообразно увеличивается, удовлетворяя условию  $a_{\text{изо}}(t) > a_{\text{крит}}$ , где  $a_{\text{крит}}$  – критическое ускорение изменения суммы всех пикселей кадра, вычисленное опытным путем, то это свидетельствует о наличии ионизации. Обработчик изображения подает сигнал об ионизации и регулятор печи начинает процесс по устранению данного явления.

**Выводы.** Разработанная система:

- снижает производственный брак от ионизации и переплава на короткой дуге;



Рис. 3. Короткая электрическая дуга

Fig. 3. Short electric arc



Рис. 4. Короткая электрическая дуга, сильная ионизация

Fig. 4. Short electric arc and the strong ionization

- повышает качество получаемого слитка, делая его конкурентноспособным на рынке металлопродукции;
- дает возможность устаревшему оборудованию производить продукцию наравне с современными сталеплавильными установками.

Полученные результаты дадут возможность в дальнейшем быстро исправлять отклонения от технологического процесса, что позволит определять возможные случаи образования брака.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Dednev A.A., Kisselman M.A., Nekhamin S.M. etc. Modernization of the control system and the electrical equipment of DSV vacuum arc furnaces // Russian Metallurgy (Metally). 2010. Vol. 2010. No. 6. P. 517 – 521.
2. C. Rigel Woodside, Paul E. King, Chris Nordlund. Arc Distribution During the Vacuum Arc Remelting of Ti-6Al-4V // Metallurgical and Materials Transactions B. 2013. Vol. 44. No. 1. P. 154 – 165.
3. Gerasimov A. V., Dednev A. A., Elizarov V. A. etc. Vacuum arc furnace for the production of composite ingots // Russian Metallurgy (Metally). 2014. Vol. 2014. No. 12. P. 940 – 944.
4. Shevchenko D. M., Ward R. M. The Role of Side Arcing in the Global Energy Partition during Vacuum Arc Remelting of INCONEL 718 // Metallurgical and Materials Transactions B. 2009. Vol. 40. No. 3. P. 248 – 253.
5. Ling Liu, M. Tamer Özsü. Data Types: Image, Video, Pixel, Voxel, Frame. Springer US, 2009. – 647 p.
6. Uwe Meyer-Baese. Image and video processing. In: Digital signal processing with field programmable gate arrays. P. 739 – 794.
7. Shengping Zhang, Huiyu Zhou, Baochang Zhang etc. Semantic representations for social behavior analysis in video surveillance systems // Signal, Image and Video Processing. 2014. December. Vol. 8. No. 1. Supplement. P. 73 – 74.
8. Seiichi Gohshi. A new signal processing method for video image-reproduce the frequency spectrum exceeding the nyquist frequency using a single frame of the video image // The Era of Interactive Media. 2013. P. 593 – 604.
9. Tao Mei, Bo Yang, Shi-Qiang Yang, Xian-Sheng Hua. Video collage: presenting a video sequence using a single image // The Visual Computer. 2009. Vol. 25. Issue 1. P. 39 – 51.
10. Romildo José da Silva, Jonas Gomes, Luiz Velho. Segmentation of video sequences using volumetric image processing. Multimedia '99. Eurographics, 2000. P. 13 – 22.
11. Pekka Paalanen, Joni-Kristian Kämäräinen, Heikki Kälviäinen. Image based quantitative mosaic evaluation with artificial video. Image Analysis // Lecture Notes in Computer Science. 2009. Vol. 5575. P. 470 – 479.
12. Glaz A.B., Smolyaninov V.V. A method of video image enhancement // Automatic Control and Computer Sciences. 2009. Vol. 43. No. 1. P. 51 – 56.
13. King Ngi Ngan, Qian Zhang. Multiview image segmentation and video tracking // Video Segmentation and Its Applications. 2011. P. 117 – 143.
14. Che-Chun Su, Anush Krishna Moorthy, Alan Conrad Bovik. Visual quality assessment of stereoscopic image and video: challenges, advances, and future trends // Visual Signal Quality Assessment. 2015. P. 185 – 212.
15. Michael S. Lew, Nicu Sebe, John P. Eakins. Challenges of image and video retrieval. Image and video retrieval // Lecture Notes in Computer Science. 2002. Vol. 2383. P. 1 – 6.

Поступила 14 мая 2015 г.

## METHOD FOR DETERMINING THE DEVIATIONS OF TECHNOLOGICAL PROCESS FOR REMELTING THE CONSUMABLE ELECTRODES IN A VACUUM ARC FURNACE BY THE VIDEO IMAGE

*A.A. Borodin*<sup>1</sup>, *E.G. Kabulova*<sup>2</sup>, *K.A. Polozhentsev*<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Mechanical Engineering, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Stary Oskol Technological Institute of National University of Science and Technology “MISIS”, Stary Oskol, Russia

<sup>3</sup> JSC “Metallurgical Plant “Electrostal”, Elektrostal, Russia

**Abstract.** The paper suggests ways to determine the deviations of technological process of vacuum arc remelting. Video cameras were installed in the vacuum arc furnace to monitor the refining process. Typically, the automated control system of remelting measure only the desired quantities for direct control, by which in some cases it is impossible to determine the occurrence of specific abnormal conditions of melting. The steelmaker can detect and eliminate them with the usage of the images from the camera. The resulting image is divided into shots. Each shot is a matrix composed of pixels. Using the amount of pixels of the image the specific abnormal remelting modes can be determined. The authors have proposed video processing algorithms to detect the abnormal melting modes.

**Keywords:** vacuum arc furnace, video camera, ionization, short arc, image brightness, pixel matrix, rate of change of the image brightness, sum of pixels, row-vector, video image, ingot, consumable electrode.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-5-318-321

### REFERENCES

1. Dednev A.A., Kisselman M.A., Nekhamin S.M., Kalinin V.I., Koshchev Yu.N. Modernization of the control system and the electrical equipment of DSV vacuum arc furnaces. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2010, vol. 2010, no. 6, pp. 517–521.
2. C. Rigel Woodside, Paul E. King, Chris Nordlund. Arc distribution during the vacuum arc remelting of Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2013, vol. 44, no. 1, pp. 154–165.
3. Gerasimov A.V., Dednev A.A., Elizarov V.A., Kisselman M.A., Nekhamin S.M. Vacuum arc furnace for the production of composite ingots. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, vol. 2014, no. 12, pp. 940–944.
4. Shevchenko D.M., Ward R.M. The Role of Side Arcing in the Global Energy Partition during Vacuum Arc Remelting of INCONEL 718. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2009, vol. 40, no. 3, pp. 248–253.
5. Ling Liu, M. Tamer Özsu. *Data types: image, video, pixel, voxel, frame*. Springer US. 2009, p. 647.
6. Uwe Meyer-Baese. Image and video processing. In: *Digital signal processing with field programmable gate arrays*. 2014, pp. 739–794.
7. Shengping Zhang, Huiyu Zhou, Baochang Zhang, Zhenjun Han, Yuliang Guo. Semantic representations for social behavior analysis in video surveillance systems. *Signal, Image and Video Processing*. December 2014, vol. 8, no. 1 supplement, pp. 73–74.
8. Seiichi Gohshi. A new signal processing method for video image-reproduce the frequency spectrum exceeding the nyquist frequency using a single frame of the video image. *The Era of Interactive Media*. 2013, pp. 593–604.
9. Tao Mei, Bo Yang, Shi-Qiang Yang, Xian-Sheng Hua. Video collage: presenting a video sequence using a single image. *The Visual Computer*. 2009, vol. 25, Issue 1, pp. 39–51.
10. Romildo José da Silva, Jonas Gomes, Luiz Velho. Segmentation of video sequences using volumetric image processing. *Multimedia '99. Eurographics 2000*, pp. 13–22.
11. Pekka Paalanen, Joni-Kristian Kämäräinen, Heikki Kälviäinen. Image based quantitative mosaic evaluation with artificial video. Image Analysis. *Lecture Notes in Computer Science*. 2009, vol. 5575, pp. 470–479.
12. Glaz A.B., Smolyaninov V.V. A method of video image enhancement. *Automatic Control and Computer Sciences*. 2009, vol. 43, no. 1, pp. 51–56.
13. King Ngi Ngan, Qian Zhang. Multiview image segmentation and video tracking. *Video Segmentation and Its Applications*. 2011, pp. 117–143.
14. Che-Chun Su, Anush Krishna Moorthy, Alan Conrad Bovik. Visual quality assessment of stereoscopic image and video: challenges, advances, and future trends. *Visual Signal Quality Assessment*. 2015, pp. 185–212.
15. Michael S. Lew, Nicu Sebe, John P. Eakins. Challenges of image and video retrieval. Image and video retrieval. *Lecture Notes in Computer Science*. 2002, vol. 2383, pp. 1–6.

### Information about the authors:

*A.A. Borodin*, MA Student

*E.G. Kabulova*, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair of Advanced Mathematics

*K.A. Polozhentsev*, Leading Master of Shop Repairing, Postgraduate (kirill.polozhentsev@gmail.com)

Received May 14, 2015

УДК 621.75.06 -52

## РАЗВИТИЕ ПОДХОДОВ К ИССЛЕДОВАНИЮ НА ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ МЕХАНИЗМОВ «ЗАЛЕЧИВАНИЯ» ДЕФЕКТОВ СПЛОШНОСТИ ОСЕВОЙ ЗОНЫ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ

**Смирнов Е.Н.<sup>1</sup>**, д.т.н. профессор кафедры металлургии и металловедения (en\_smirnov@i.ua)

**Скляр В.А.<sup>1</sup>**, к.т.н., доцент кафедры металлургии и металловедения (fan-f1@yandex.ru)

**Белевитин В.А.<sup>2</sup>**, д.т.н. профессор, научный руководитель лаборатории  
«Технологии решения и защиты авторских разработок» (belewitina@rambler.ru)

**Шмыгля Р.А.<sup>3</sup>**, магистр (Ramzes.112@mail.ru)

**Смирнов О.Е.<sup>4</sup>**, инженер (olegsmirnoff1@yandex.ua)

<sup>1</sup> Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова, филиал НИТУ «МИСиС»  
(309516, Россия, Белгородская обл., Старый Оскол, микрорайон Макаренко, 42)

<sup>2</sup> Челябинский государственный педагогический университет  
(454080, Россия, Челябинск, пр. Ленина, 69)

<sup>3</sup> Донецкий национальный технический университет  
(283001, Донецк, ул. Артема, 58)

<sup>4</sup> ЗАО «Осколтелеком»  
(309504, Россия, Старый Оскол, мкр. Набережный, 11)

**Аннотация.** Концепция минимизации металлоемкости конструкции готового изделия предъявляет все более высокий комплекс требований к стали как к конструкционному материалу. В этой связи вопросы, связанные с изучением поведения дефектов макроструктуры непрерывнолитой заготовки (усадочная раковина, газовые пузыри, осевая пористость) в процессе деформирования имеют актуальный характер. В работе представлено дальнейшее развитие методов исследования процессов обработки металлов давлением с использованием слоистых физических моделей. Использование слоистых моделей в совокупности с предложенным способом нанесения дефектов на поверхности  $n$ -го слоя и методикой обработки информации о характере его формоизменения позволяют оценивать влияние степени деформации на процесс их «залечивания». Выполнена первичная адаптация предлагаемого способа применительно к условиям моделирования процесса деформирования непрерывнолитой сортовой заготовки в первых трех прямоугольных калибрах обжимной клетки линейного стана 500/370 ПАО «Донецкий металлопрокатный завод». Полученные экспериментальные данные позволили уточнить существующий механизм «залечивания» осевых дефектов сплошности металла в зависимости от величины суммарной вытяжки и схемы приложения деформационного воздействия.

**Ключевые слова:** процесс деформации, сортовая прокатка, заготовка, прямоугольный калибр, обжимная клеть, физическая модель, процесс «выкатки», дефекты макроструктуры.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-5-322-327

Использование сортовой непрерывнолитой заготовки (НЛЗ) малого сечения выявило целый ряд проблем, связанных с обеспечением равномерного уплотнения металла по сечению готового проката, которые ранее не проявлялись при использовании горячекатаной заготовки, полученной по схеме слиткового передела. В наибольшей степени это характерно для случаев производства сортового проката из качественных конструкционных и рессорно-пружинных марок сталей [1].

В этой связи вопросы, связанные с изучением поведения дефектов сплошности макроструктуры непрерывнолитой сортовой заготовки (усадочная раковина и осевая пористость) в процессе деформирования, имеют актуальный характер.

Как показал анализ литературных данных, наиболее сложным в реализации с использованием физических моделей является процесс исследования поведения

внутренних дефектов макроструктуры непрерывнолитой заготовки в ходе прокатки [2 – 4]. В этом случае можно выделить два наиболее применяемых подхода.

В рамках первого подхода наиболее часто используется взаимосвязь параметров макроструктуры готового проката с параметрами деформирования, а именно: с величиной суммарного относительного обжатия  $\varepsilon_{\Sigma}$  [5]; соотношением сторон непрерывнолитой заготовки [6]; изменением удельного сопротивления материала физической модели [7].

Второй подход основан на прямых экспериментальных исследованиях с использованием физических моделей с конкретным видом (группой) дефекта макроструктуры металла [8 – 10].

В рамках данного направления заслуживает особого внимания подход, который применяется на протяжении ряда лет в Уральском федеральном техничес-

ком университете на кафедре обработки металлов давлением (ОМД) под руководством профессора Логинова Ю.Н. [11 – 14]. Авторы исследовали поведение одиночной поры. Следует отметить, что предложенный подход является логическим развитием работ И.Я. Тарновского [15], связанных с изучением характера распространения деформации по сечению раската на слоистых свинцовых образцах.

Также следует отметить, что в случае производства сортового проката из НЛЗ малого сечения, дефекты наследственно передаются и сохраняются в прокате даже при очень больших степенях вытяжки [16]. Это обуславливается характером формируемой макроструктуры металла как в поперечном, так и в продольном его сечениях [17].

Целью работы является разработка методологии нового подхода к исследованию процесса поведения дефектов сплошности макроструктуры металла осевой области НЛЗ с использованием физических моделей.

В основу нового подхода были заложены следующие допущения:

- в связи с тем, что осевые дефекты макроструктуры имеют значительную протяженность вдоль продольной оси, принимается, что они подобны поверхностным дефектам и к ним применимо понятие «выкатка»;
- наличие градиента плотности локализации дефектов на единицу площади поперечного сечения позволяет представить данную область в виде послойной модели с дискретным характером ее изменения;
- рассматривается изменение высоты условного слоя металла с уже имеющимися дефектами, причем в процессе прокатки новые дефекты не образуются;
- в процессе прокатки дополнительного заглубления дефекта за счет нарушения сплошности металла не происходит;
- выкатка дефекта пропорциональна изменению высоты условного слоя металла, а угол наклона поверхностных дефектов к вертикальной оси симметрии раската и направлению прокатки (продольные или поперечные), а также их положение в плоскости сечения профиля в процессе прокатки могут меняться.

По аналогии с «выкаткой» поверхностных дефектов заготовки при прокатке, для установления взаимозависимости «выкатки» внутренних дефектов  $i$ -го слоя от характера распространения деформации по сечению раската целесообразно, с одной стороны, использовать слоистые физические модели, а с другой – рассматривать данный процесс с позиции закона постоянства объема. В этом случае слоистая физическая модель позволяет, как доказано в работе [15], зафиксировать распространение деформации по сечению раската. Это может быть достигнуто за счет предварительного нане-

сения на одну из поверхностей слоя дефектов разного вида и в требуемом количестве.

При таком подходе для количественного определения величины «выкатки» необходимо учитывать, как минимум, два коэффициента формоизменения: высотный и поперечный. Продольный коэффициент формоизменения будет дополнительным. В этом случае статистическая зависимость между величиной «выкатки» дефектов в  $i$ -том слое будет представлять собой функцию от коэффициентов высотного и поперечного формоизменения:

$$K_v^i = f(\varepsilon_h, \varepsilon_b), \quad (1)$$

где  $\varepsilon_h$  – условная относительная высотная деформации дефекта-имитатора;  $\varepsilon_b$  – условная относительная поперечной деформации дефекта-имитатора.

Необходимо отметить, что по аналогии с «выкаткой» поверхностных дефектов влияние каждого из них будет различным [18].

Как отмечено в работе [13], дефект-имитатор можно считать «вмонтированным» в макрообъем материала, который подвергается продольной деформации  $\lambda_d$  (удлинению). Следовательно, вместе с длиной макрообъема увеличивается и длина дефекта, т. е.  $\lambda_d$  должна быть больше единицы.

На основании изучения имеющихся подходов к исследованию «выкатки» поверхностных дефектов на физических моделях, было предложено использовать дефект-имитатор в форме треугольной призмы заданной длины (рис. 1).

Эксперимент проводили применительно к условиям деформирования непрерывнолитой заготовки в первой паре калибров обжимной клетки стана 500/370 ПАО «Донецкий металлопрокатный завод» (ДМПЗ). При этом, в случае использования масштаба моделирования 1:5, ширина исходной физической модели будет колебаться в пределах 24,0 – 30,0 мм.

Учитывая многовариантность решаемой задачи, была разработана пластинчатая конструкция матрицы (рис. 2). На одну из граней пластины наносились три дефекта-имитатора, каждый из которых имел свою

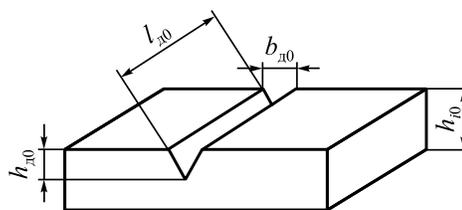


Рис. 1. Схема дефекта-имитатора в форме треугольной призмы:  $l_{d0}$ ,  $b_{d0}$ ,  $h_{d0}$  – начальные размеры дефекта-имитатора,  $h_{i0}$  – начальная толщина  $i$ -го слоя

Fig. 1. Scheme of defect simulator in the form of a triangular prism:  $l_{d0}$ ,  $b_{d0}$ ,  $h_{d0}$  – initial size of the defect simulator,  $h_{i0}$  – initial thickness of the  $i$ -th layer

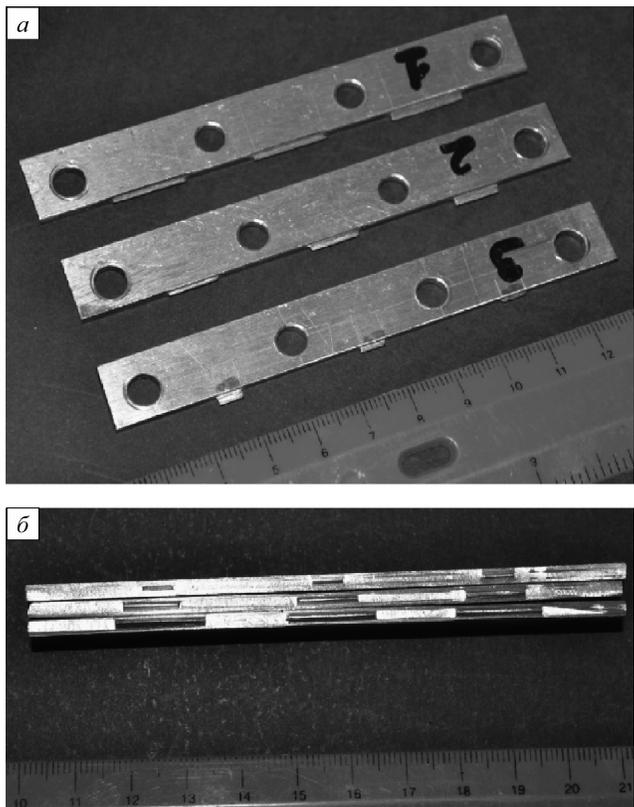


Рис. 2. Вид стальных вставок для нанесения дефектов (а) и матрицы в сборе (б)

Fig. 2. View of steel inserts for application of defects (a) and matrix assembly (b)

длину (5, 10 и 15 мм). Полученные на свинцовых пластинах отпечатки дефектов-имитаторов были замерены с использованием микроскопа БИМ-1 с точностью 0,005 мм (длина  $l$  и ширина  $b$ ). Глубину дефекта  $h$  измеряли с использованием модернизированного штангенциркуля.

Были изготовлены три серии слоистых физических моделей, отличающихся схемой расположения дефектов (рис. 3). Пластины соединялись между собой с использованием штифтового соединения.

Такая конструкция образца позволяет оценить характер локализации деформации в слое толщиной, сопоставимой с глубиной дефекта. В дальнейшем физические модели (рис. 4) были прокатаны на стане 100, после чего их разъединяли и производили повторный обмер размеров дефектов-имитаторов.

Приведенные на рис. 5 результаты обработки экспериментальных данных о характере изменения размеров поперечного сечения дефектов-имитаторов, по сути дела, есть численная характеристика первого из двух выявленных механизмов «залечивания», в основе которого лежит процесс их постепенной «выкатки». Видно, что по мере роста величины суммарной вытяжки наблюдается четкая тенденция уменьшения размеров  $h$  и  $b$  дефектов. При этом, в случае реализации однонаправленного деформационного воздействия в нескольких проходах (рис. 5, б), величина уменьшения глубины дефекта  $h$  примерно на 50 – 70 % выше, чем уменьшение его ширины  $b$ .

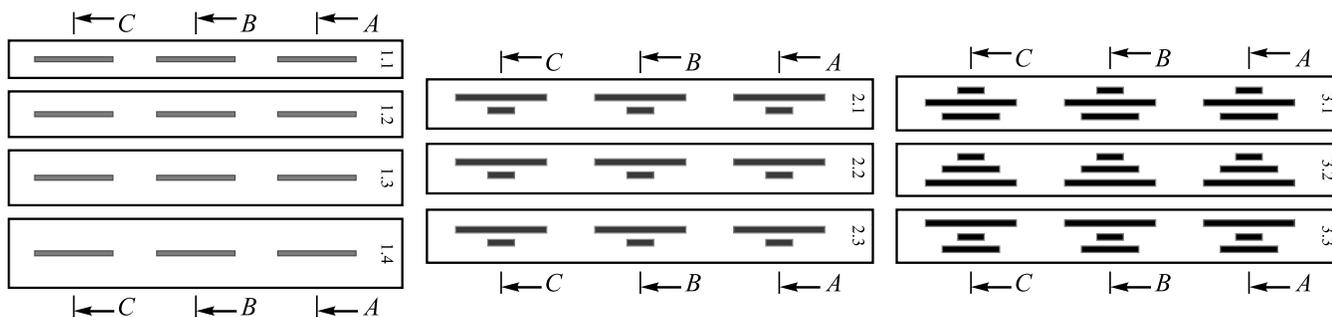


Рис. 3. Схема расположения дефектов на образцах

Fig. 3. Scheme of defects location on samples



Рис. 4. Вид физических моделей после прокатки: а – в калибре 1, б – в калибрах 1, 2, 3 (с кантовкой на 90° после калибра 2)

Fig. 4. View of physical models after rolling: а – pass 1, б – in passes 1, 2, 3 (with tilting of 90° after 2 pass)

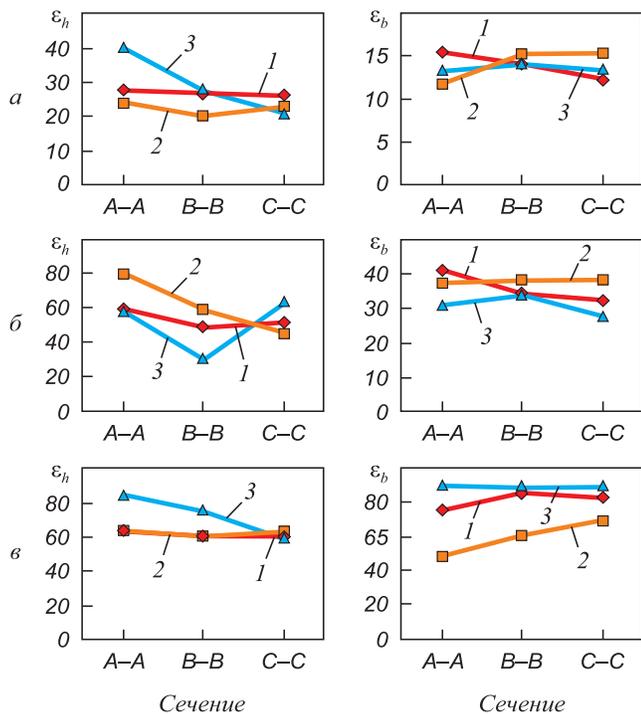


Рис. 5. Изменение  $\epsilon_h$  и  $\epsilon_b$  в зависимости от величины суммарной вытяжки:  
 $\lambda_1 = 1,144$  (а);  $\lambda_{1-2} = 1,340$  (б);  $\lambda_{1-3} = 1,562$  (в) и начальной длины дефектов-имитаторов, мм: 1 – 15; 2 – 10; 3 – 5

Fig. 5. Changes of  $\epsilon_h$  and  $\epsilon_b$  depending on the total stretch:  
 $\lambda_1 = 1,144$  (a);  $\lambda_{1-2} = 1,340$  (б);  $\lambda_{1-3} = 1,562$  (в) and the initial length of defect imitators, mm: 1 – 15; 2 – 10; 3 – 5

В тоже время, смена на 90° направления приложения деформационного воздействия приводит к некоторой стабилизации на одном уровне ранее интенсивно уменьшающегося размера  $h$  и возрастанию интенсивности уменьшения размера  $b$ . В целом, прокатка моделей с величиной суммарной вытяжки  $\lambda_{1-3} = 1,562$  обеспечивает уменьшение размеров дефектов в пределах 60 – 80 %, а в ряде случаев приводит и к полной их «выкатке» по одному из размеров.

Вторым механизмом залечивания следует считать «схлопывание», в основе которого лежит эффект заполнения полости дефекта-имитатора металлом из соседних слоев за счет вдавливания. Можно предположить, что в реальных условиях во время деформирования будет происходить резкое сближение границ существующих несплошностей (поры, дефекты усадочного происхождения и т. д.), которые перпендикулярны направлению приложения внешнего деформационного воздействия. При этом, в зависимости от создаваемого напряженно-деформированного состояния в прилегающих к ним слоях металла, возможны случаи вдавливания порций металла в имеющиеся пустоты.

Для оценки «выкатки» дефектов-имитаторов использовали категории, принятые в теории прокатки. С одной стороны, для всего металла образца выполняется условие постоянства объема, с другой – поверхность

дефекта-имитатора является свободной поверхностью для материала заготовки и эта поверхность может перемещаться деформируемым материалом с постепенным его наполнением [13]. С учетом равенства вытяжек во всех слоях металла можно записать формулу для определения коэффициента выкатки  $K_B$  внутреннего дефекта-имитатора:

$$K_B = \frac{(\eta\xi)_{\text{база}}}{\eta_i\xi_i}; \quad (2)$$

$$(\eta\xi)_{\text{база}} = \frac{l_0^i}{l_1^i}, \quad (3)$$

где  $l_0^i$  и  $l_1^i$  – длина  $i$ -го дефекта-имитатора до и после прокатки, полученная в результате его обмера;  $\eta = h_1/h_0$  – коэффициент обжатия образца;  $\xi = b_1/b_0$  – коэффициент уширения образца;  $\eta_i$  и  $\xi_i$  – коэффициенты уменьшения глубины  $h_i$  и ширины  $b_i$  дефекта-имитатора за стадию деформирования.

Если в процессе прокатки происходит «выкатка» дефектов, то величина  $K_B > 1$ .

Обработка полученных экспериментальных данных с использованием вышеописанной методики позволила получить регрессионную модель, связывающую величину «выкатки» дефекта  $K_B$  с относительной величиной площади его поперечного сечения и приложенной вытяжкой:

$$K_B = 17,395 - 75,76 \left( \frac{f_i}{F_0} \right) - 29,19\lambda + 818,69 \left( \frac{f_i}{F_0} \right)^2 + 14,15\lambda^2 + 0,48 \left( \frac{f_i}{F_0} \right) \lambda, \quad (4)$$

где  $f_i/F_0$  – отношение площади поперечного сечения  $i$ -го дефекта-имитатора  $f$  к площади поперечного сечения физической модели  $F_0$ ;  $\lambda$  – величина коэффициента вытяжки физической модели в серии.

**Выводы.** В работе представлено дальнейшее развитие методов исследования процессов ОМД с использованием слоистых физических моделей. Использование слоистых моделей в совокупности с предложенным способом нанесения дефектов на поверхность  $n$ -го слоя и методикой обработки информации о характере его формоизменения позволяет оценивать влияние степени деформации на процесс их «залечивания». Выполнена первичная адаптация предлагаемого способа применительно к условиям моделирования процесса деформирования непрерывнолитой заготовки в первых трех прямоугольных калибрах обжимной клетки линейного стана 500/370 ПАО «ДМПЗ». Полученные экспериментальные данные позволили уточнить существующий механизм «залечивания» осевых дефектов сплошности металла в зависимости от величины суммарной вытяжки и схемы приложения деформационного воздействия.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Термомеханическая обработка проката из непрерывнолитой заготовки малого сечения / В.В. Парусов, А.К. Белитченко, Н.А. Богданов и др. – Запорожье: ЗГУ, 2000. – 142 с.
2. Park J.J. Prediction of void closure in a slab during various deformation processes // *Journal of Mechanical and Technology*. 2011. No. 25 (11), pp. 2871 – 2876.
3. Юрьев А.Б., Годик Л.А., Нугуманов Р.Ф. и др. Изучение трансформации дефектов непрерывнолитой заготовки при производстве рельсов // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2009. № 2. С. 42 – 44.
4. Сычков А.Б., Жигарев М.А., Перчатник А.В. и др. Трансформация дефектов непрерывнолитой заготовки в поверхностные дефекты проката // *Металлург*. 2006. № 2. С. 60 – 64.
5. Кокшарев Ю.М., Лубяной О.А. Исследование заваривания внутренних дефектов в сортовых заготовках, полученных на МНЛЗ ОАО «ЗСМК». – В кн.: Металлургия: технологии, управление, инновации, качество: Тр. Всерос. науч.-практич. конф. – Новокузнецк: СибГФУ, 2010. С. 73 – 77.
6. Прокатка рельсов из непрерывнолитой заготовки // *Информация руководителю. Ин-т «Черметинформация»*. 2003. № 10. С. 38.
7. Пат. 77283 UA. Спосіб фізичного моделювання процесів пророблення структури в безперервнолитих зливках при пластичній деформації / О.А. Мінаєв, Є.М. Смирнов, А.П. Митьєв и др.: заявл. 22.10.2004; опубл. 15.11.2006. Бюл. № 11.
8. Tirosh J., Shrizby A., Rubinski I. Evolution of anisotropy in the compliances of porous materials during plastic stretching or rolling – analysis and experiments // *Mechanics of Materials*. 1999. July. Vol. 31. Issue 7. P. 449 – 460.
9. Tripathy P.K., Das S., Jha M.K. etc. Migration of slab defects during hot rolling // *Iron making and Steelmaking*. 2006. Vol. 33. No. 6. P. 447 – 483.
10. Завьялов А.А., Логвинов А.В., Тулупов О.Н. Лабораторные методы моделирования ликвации при деформации непрерывнолитой сортовой заготовки // *Обработка сплошных и слоистых материалов: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2001. С. 66 – 71.*
11. Логинов Ю.Н., Еремеева К.В. Поведение при прокатке дефекта типа поры, примыкающей к поверхности полосы // *Производство проката*. 2008. № 10. С. 2 – 6.
12. Логинов Ю.Н., Еремеева К.В. Формоизменение одиночно расположенной поры в круглой заготовке при волочении // *Кузнечно-штамповочное производство*. 2009. № 4. С. 3 – 8.
13. Логинов Ю.Н., Еремеева К.В. Прокатка заготовки с одиночно расположенной в объеме порой // *Заготовительное производство в машиностроении*. 2009. № 11. С. 33 – 37.
14. Логинов Ю.Н., Еремеева К.В. Формоизменение поры в центральной части прутка на начальной стадии прессования // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2009. № 9. С. 46 – 51.
15. Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ляшков В.Б. Деформация металла при прокатке. – Свердловск: Металлургиздат, 1956. – 287 с.
16. Аникеев В.В. Структурная наследственность углеродистой стали в системе «слиток – прокат» различных заводов производителей. – В кн.: Генезис, теория и технология литых материалов: Матер. Междунар. науч.-технич. конф. – Владимир, 2002. С. 221 – 222.
17. Смирнов Е.Н., Лейрих И.В., Зуб В.В. Исследование динамики структурообразования и свойства высококачественной сварочной проволоки из непрерывнолитой стали 07Г1НМА // *Металлы и литье Украины*. 2006. № 3 – 4. С. 43 – 47.
18. Шубин И.Г., Тулупов С.А. Совершенствование калибровки валков заготовительного стана, повышающее выкатку поверхностных дефектов. – Магнитогорск: МГМИ, 1990. – 10 с.

Поступила 27 марта 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 5, PP. 322–327.

**DEVELOPMENT OF THE STUDY OF MECHANISM OF “HEALING” DEFECTS OF CONTINUOUS CAST BILLET AXIAL ZONE ON A PHYSICAL MODEL**

*E.N. Smirnov<sup>1</sup>, V.A. Sklyar<sup>1</sup>, V.A. Belevitin<sup>2</sup>, R.A. Shmygulya<sup>3</sup>, O.E. Smirnov<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Stary Oskol Technological Institute of National University of Science and Technology “MISiS”, Stary Oskol, Russia

<sup>2</sup>Chelyabinsk State Pedagogical University, Chelyabinsk, Russia

<sup>3</sup>National Technical University of Donetsk, Donetsk

<sup>4</sup>CJSC “OskolTelecom”, Stary Oskol, Russia

**Abstract.** The concept of metal construction minimization of finished products requires an increasing set of requirements for steels as structural materials. In this context, issues related to the study of the continuous casting defects macrostructure behavior (shrinkage, gas holes, axial porosity) during deformation are very actual. This work presents further development of metal forming processes research methods with layered physical models use. Layered models usage in conjunction with the proposed method of defects application on the surface of *n*-th layer and processing information method concerning the nature of its forming allows to evaluate the rate deformation influence during the process of “healing”. The initial adaptation of the proposed method applying to the conditions of the deformation process simulation of continuous casting in the first three rectangular breakdown stand calibers of linear mill 500/370 of PJSC “DMPZ” has been performed. Obtained experimental data allow to clarify the existing mechanism of “healing” of axial discontinuities defects in metal depending on the overall elongation and schemes of deformation application.

**Keywords:** deformation process, section rolling, billets, rectangular gauge, crimp cage, physical model, process of “healing”, defects macrostructure.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-5-322-327

**REFERENCES**

1. Parusov V.V., Belitchenko A.K., Bogdanov N.A. etc. *Termomekhanicheskaya obrabotka prokata iz nepreryvnoilitoi zagotovki malogo secheniya* [Thermomechanical rolling process of continuous casting billet of small section]. Zaporizhia: ZGU, 2000, 142 p. (In Russ.).
2. Park J.J. Prediction of void closure in a slab during various deformation processes. *Journal of Mechanical and Technology*. 2011, no. 25 (11), pp. 2871–2876.
3. Yur’ev A.B., Godik L.A., Nugumanov R.F. etc. Transformation of defects in continuous-cast billet during rail production. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, Issue 2, pp. 125–126.
4. Sychkov A.B., Zhigarev M.A., Perchatnik A.V. etc. The transformation of defects in continuous-cast semifinished products into surface defects on rolled products. *Metallurgist*. 2006, vol. 50, Issue 1, pp. 83–90.
5. Koksharev Yu.M., Lubyanoi O.A. Research of brewing of internal defects in the billets produced on the CCM of JSC “ZSMK”. In: *Metallurgiya: tekhnologii, upravlenie, innovatsii, kachestvo: Trudy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Metallurgy: tech-

- nology, management, innovation, quality: Proceedings of the All-Russian Scientific-Practical Conf.]. Novokuznetsk, SibGFU, 2010, pp. 73–77. (In Russ.).
6. Rolling of rails from continuous casting billet: inf. head. *Byull. Chernaya metallurgiya*. OAO “Chermetinformatsiya”. 2003, no. 10, 38 p. (In Russ.).
  7. Minaev O.A., Smirnov E.M., Mit’ev A.P., Grigor’ev M.V., Demidova I.A., Slugin O.O., Myagkov V.M. *Sposib fizichnogo modelyuvannya protsesiv proroblennya strukturi v bezperervnolitykh zlivkakh pri plastichnii deformatsii* [Method of physical modeling of the behavior of the prior structure in continuously cast ingots at plastic deformation]. Patent no. 77283 UA. Byul. 2006, no. 11. (In Ukr.).
  8. Tirosh J., Shrizby A., Rubinski I. Evolution of anisotropy in the compliances of porous materials during plastic stretching or rolling – analysis and experiments. *Mechanics of Materials*. July 1999, vol. 31, Issue 7, pp. 449–460.
  9. Tripathy P.K., Das S., Jha M.K. etc. Migration of slab defects during hot rolling. *Iron making and Steelmaking*. 2006, vol. 33, no. 6, pp. 447–483.
  10. Zav’yalov A.A., Logvinov A.V., Tulupov O.N. Laboratory modeling methods of segregation during deformation of continuous cast billet. In.: *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov: Mezhvuzovskii sbornik nauchnykh trudov* [Treatment of solid and laminates materials: Int. collection of sci. works]. Magnitogorsk: MG TU, 2001, pp. 66–71. (In Russ.).
  11. Loginov Yu.N., Ereemeeva K.V. Behavior of defect of pore type, adjoining to strip surface, during rolling. *Proizvodstvo prokata*. 2008, no. 10, pp. 2–6. (In Russ.).
  12. Loginov Yu.N., Ereemeeva K.V. Changes in shape of single pore situated in a round billet during the drawing process. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo*. 2009, no. 4, pp. 3–8. (In Russ.).
  13. Loginov Yu.N., Ereemeeva K.V. Rolling of billet with single pore located in volume. *Zagotovitel’noe proizvodstvo v mashinostroenii*. 2009, no. 11, pp. 33–37. (In Russ.).
  14. Loginov Yu.N., Ereemeeva K.V. Deformation of pores in the central part of the rod at initial pressing stage. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2009, no. 9, pp. 46–51. (In Russ.).
  15. Tarnovskii I.Ya., Pozdeev A.A., Lyashkov V.B. *Deformatsiya metalla pri prokatke* [Metal deformation during rolling]. Sverdlovsk: Metallurgizdat, 1956, 287 p. (In Russ.).
  16. Anikeev V.V. Structural heredity of carbon steel in the “ingot - rolled” system at different manufacturing plants. In: *Genesis, teoriya i tekhnologiya litykh materialov: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Genesis, theory and technology of cast materials: Materials of Int. Sci.-Tech. Conf.]. Vladimir, 2002, pp. 221–222. (In Russ.).
  17. Smirnov E.N., Leirikh I.V., Zub V.V. Investigation of structure formation dynamics and properties of high-quality welding wire of continuously cast 07G1NMA steel. *Metall i lit’e Ukrainy*. 2006, no. 3–4, pp. 43–47. (In Russ.).
  18. Shubin I.G., Tulupov S.A. *Improving the calibration of rolls for manufacturing mill which helps to reduce the size of surface defects*. MGMI, Magnitogorsk. 1990. 10 p. (In Russ.).

#### Information about the authors:

**E.N. Smirnov**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metallurgy and Metal Science” (en\_smirnov@i.ua)

**V.A. Sklyar**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallurgy and Metal Science” (fan-f1@yandex.ru)

**V.A. Belevitin**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Laboratory “Technology of solution and protection of authoring” (belevitina@rambler.ru)

**R.A. Shmyglya**, MA Student (Ramzes.112@mail.ru)

**O.E. Smirnov**, Engineer (olegsmirnoff1@yandex.ua)

Received March 27, 2015

УДК 669.2/8:622.788

## ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТИТАНОМАГНЕТИТОВЫХ КАЧКАНАРСКИХ ОКАТЫШЕЙ\*

**Юрьев Б.П.**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика  
и информатика в металлургии» (yurev-b@mail.ru)

**Гольцев В.А.**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика  
и информатика в металлургии» (v.a.goltsev@urfu.ru)

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

**Аннотация.** Определены теплофизические свойства титаномагнетитовых качканарских окатышей различной основности. С применением метода смешения найдена зависимость средней физической теплоемкости окатышей от температуры и фазового состава. Для нахождения кажущейся теплоемкости окатышей использована гравиметрическая установка с непрерывной регистрацией изменения массы окатыша, обеспечивающая создание окислительной или нейтральной атмосферы с целью разделения процессов окисления и декарбонизации. Определены коэффициенты температуропроводности окатышей с применением квазистационарного метода, позволяющего в режиме непрерывного нагревания использовать простые расчетные соотношения. Коэффициенты теплопроводности окатышей найдены из уравнения, связывающего их плотность, теплоемкость и коэффициенты температуропроводности. Полученные результаты представляют определенный интерес и могут быть использованы при проектировании новых обжиговых агрегатов, а также при оптимизации конструктивных и режимных параметров работы существующих.

**Ключевые слова:** титаномагнетитовые окатыши, энтальпия, теплоемкость, плотность, коэффициенты температуро- и теплопроводности, основность, окисление, диссоциация, обжиговые агрегаты.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-5-328-333

Для проведения инженерных расчетов, связанных с проектированием новых обжиговых установок, а также с оптимизацией конструктивных и режимных параметров работы существующих, требуется знание теплофизических характеристик материалов, подвергаемых тепловой обработке, а также изменение этих характеристик в процессе обжига в широком интервале температур. Эти характеристики также необходимы в расчетах по тепло- и массообмену в слое железорудных окатышей, подвергаемых окислительному обжигу. Однако в значительной мере не только новые, но и даже известные методы расчета параметров процессов не могут быть применены из-за отсутствия достаточно надежных данных о теплофизических свойствах.

Целью данной работы являлось определение теплофизических характеристик титаномагнетитовых окатышей Качканарского ГОКа в процессе нагрева в широком диапазоне измерения температур.

Среднюю физическую теплоемкость окатышей изучали методом смешения, который в настоящее время является весьма распространенным [1–7] по сравнению с другими методами [8–10], на установке с адиабатическим калориметром системы Скуратова [1]. Исходный химический состав исследуемых окатышей приведен в таблице.

Образцы железорудных окатышей массой 4–5 г помещали в ампулу из жаростойкого металлического сплава, нагревали в трубчатой печи сопротивления, давали выдержку для выравнивания температурного поля, а затем сбрасывали в теплоприемник калориметра. С целью получения зависимости средней физической теплоемкости не только от температуры, но и от фазового состава, изменяющегося при нагреве в связи с протеканием в окатышах физико-химических процессов, в крышке ампулы были сделаны отверстия для доступа кислорода воздуха к поверхности окатышей. Поэтому при нагреве образцов в материале происходили превращения, связанные с окислением магнетита, разложением карбоната кальция и образованием новых химических соединений (ферритов, силикатов кальция и др.).

Найденные из опыта значения энтальпии при нагревании  $\Delta H$ , кДж/кг и средней физической теплоемкости  $\bar{c}_p$ , кДж/(кг·К) исследованных образцов в интервале температур от 273 (нижний предел) до 1473 К (верхний предел) с учетом изменения их фазового и химического состава представлены в виде интерполяционных уравнений:

основность 0,3

$$\Delta H = 0,34(T - 273) + 8,4 \cdot 10^{-4}(T - 273)^2 - 264 \cdot 10^{-9}(T - 273)^3;$$

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации, постановление № 211, контракт № 02.03.21.0006.

Химический состав исследуемых окатышей

Chemical composition of the investigated pellets

Основность	Содержание, % (по массе)									
	Fe	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	ПМПП
0,30	59,56	25,93	1,18	3,93	2,38	2,40	2,40	0,56	0,03	1,48
1,00	56,49	24,44	3,86	3,86	2,42	2,59	2,26	0,54	0,02	3,34
1,30	55,30	24,20	4,93	3,79	2,26	2,54	2,22	0,52	0,02	4,20
1,50	53,84	23,56	5,87	3,91	2,70	2,58	2,15	0,52	0,02	4,87
2,20	53,45	22,77	9,68	4,40	2,26	2,37	2,14	0,52	0,02	7,59

$$\bar{c}_p = 0,34 + 8,4 \cdot 10^{-4}(T - 273) - 264 \cdot 10^{-9}(T - 273)^2;$$

основность 1,0

$$\Delta H = 0,46(T - 273) + 4,85 \cdot 10^{-4}(T - 273)^2 - 45,5 \cdot 10^{-9}(T - 273)^3;$$

$$\bar{c}_p = 0,46 + 4,85 \cdot 10^{-4}(T - 273) - 45,5 \cdot 10^{-9}(T - 273)^2;$$

основность 1,3

$$\Delta H = 0,52(T - 273) + 3,1 \cdot 10^{-4}(T - 273)^2 - 25,5 \cdot 10^{-9}(T - 273)^3;$$

$$\bar{c}_p = 0,52 + 3,15 \cdot 10^{-4}(T - 273) - 25,5 \cdot 10^{-9}(T - 273)^2;$$

основность 1,5

$$\Delta H = 0,575(T - 273) + 3,6 \cdot 10^{-4}(T - 273)^2 - 17,0 \cdot 10^{-9}(T - 273)^3;$$

$$\bar{c}_p = 0,575 + 3,6 \cdot 10^{-4}(T - 273) - 17,0 \cdot 10^{-9}(T - 273)^2;$$

основность 2,2

$$\Delta H = 0,75(T - 273) + 2,5 \cdot 10^{-4}(T - 273)^2 - 49,4 \cdot 10^{-9}(T - 273)^3;$$

$$\bar{c}_p = 0,75 + 2,5 \cdot 10^{-4}(T - 273) - 49,4 \cdot 10^{-9}(T - 273)^2.$$

При разработке методики расчета окислительного обжига железорудных окатышей в неподвижном слое также вместо действительной теплоемкости окатышей используют ее кажущееся значение. Это связано с тем, что в процессе термической обработки в окатышах протекает ряд сложных экзо- и эндотермических превращений, интенсивность протекания которых зависит от скорости нагрева, размера куска, состава окружающей среды и др. От этих же факторов зависит и количество теплоты, поступающей к окатышам, учесть которое можно только с помощью кажущейся теплоемкости.

Кажущуюся среднюю теплоемкость окатышей  $\bar{c}_k$ , кДж/(кг·К) определяли в соответствии с выражением

$$\bar{c}_k = \bar{c}_\phi \pm \frac{\sum Q_{хим}}{G\Delta T}, \quad (1)$$

где  $\bar{c}_\phi$  – средняя физическая теплоемкость, кДж/(кг·К);  $\sum Q_{хим}$  – суммарные тепловые эффекты химических реакций, протекающих в окатышах, кДж;  $G$  – масса вещества, претерпевающего превращения из расчета на 1 кг окатышей, кг;  $\Delta T$  – температурный интервал протекания данного процесса, К.

В рассматриваемом случае в окатышах протекали процессы испарения влаги, диссоциации карбонатов и окисления магнетита, т. е.

$$\sum Q_{хим} = Q_{вл} + Q_{дис} - Q_{ок}. \quad (2)$$

Для изучения кинетических закономерностей процессов удаления влаги, окисления и декарбонизации была использована гравиметрическая установка с непрерывной регистрацией изменения массы окатыша во время обжига [11]. Измерения проводили на аналитических весах с передачей показаний на вторичный прибор и записью данных. Взвешивающее устройство позволяло регистрировать изменение массы образца с точностью до  $\pm 0,0005$  г. Обжиг материала производили до температуры 1523 К со скоростью нагрева свыше 50 град/мин в малоинерционной электрической печи. Для обжига материала до температуры 1673 К со скоростью 100 град/мин и выше использовали электрическую печь с плавным подъемом и опусканием образца в рабочее пространство.

Изучению подвергали окатыши основностью 0,3; 1,3 и 2,2. Скорость нагрева для каждой основности составляла 25, 50 и 100 град/мин. Средний диаметр окатышей составлял 12 мм. Окатыш, подвешенный в платиновой корзине к весам, помещали в печь и нагревали с заданной скоростью. При скорости нагрева 25 и 50 град/мин удаление влаги происходило до 573 К, при 373 град/мин – до 623 К. Окисление происходило от 573 К и с ростом скорости нагрева соответственно до 1423, 1473 и 1573 К. Декарбонизация происходила от 873 К и с ростом скорости нагрева для окатышей основностью 0,3 соответственно до 1173, 1223 и 1273 К, для окатышей

основностью 1,3 и 2,2 соответственно до 1273, 1323 и 1373 К. Для разделения процессов окисления и декарбонизации опыт проводили с двумя окатышами одной основности, один из которых обжигали в воздушной среде, а другой – в атмосфере аргона.

Полученные значения изменения массы окатышей от температуры за счет протекания отмеченных процессов использовали для расчетов теплот процессов по формулам, приведенным в работе [11].

Результаты расчетов кажущейся теплоемкости  $\bar{c}_k$  представлены в виде графиков на рис. 1. Видно, что в начале (до 523 К) теплоемкость  $\bar{c}_k$  возрастает, что связано с удалением влаги, а затем (в интервале от 523 до 673 К) снижается вследствие выделения теплоты в результате поверхностного окисления зерен магнетита. Для окатышей основностью 1,3 и 2,2 значительное возрастание теплоемкости  $\bar{c}_k$  в интервале 873 – 1223 К связано с диссоциацией известняка, а снижение теплоемкости окатышей основностью 0,3 обусловлено выделением теплоты от объемного окисления зерен магнетита.

Окислительные процессы, интенсивно проходящие после разложения известняка в окатышах основностью 1,3 и 2,2, резко снижают теплоемкость материала в интервале 1223 – 1423 К. В дальнейшем, по мере завершения окислительного процесса и увеличения диффузионного сопротивления кислороду, вследствие спекания образцов теплоемкость их начинает расти, приближаясь по значению к  $\bar{c}_\phi$ .

Влияние скорости нагрева проявляется в смещении процессов удаления влаги, окисления и декарбонизации в сторону высоких температур. Вследствие этого на графиках кривые кажущихся теплоемкостей окатышей с увеличением скорости нагрева также смещаются в область высоких температур. С увеличением скорости нагрева в области низкотемпературного окисления и декарбонизации кажущаяся теплоемкость окатышей несколько возрастает, а в области высокотемпературного окисления (1323 – 1523 К) падает. Это связано с уменьшением продолжительности обжига окатышей с ростом скорости нагрева. С уменьшением скорости нагрева процессы окисления в низкотемпературной области 573 – 873 К протекают полнее, чем при более высокой скорости нагрева, когда процесс окисления не успевает охватить внутренние слои окатыша. В интервале температур 1073 – 1323 К, относящемуся к разложению известняка, большой перепад температур при более высокой скорости нагрева интенсифицирует процесс декарбонизации, сдвигая его в сторону более низких температур. Все это нашло отражение в ходе кривых кажущейся теплоемкости при разных скоростях нагрева. С увеличением основности кажущаяся теплоемкость возрастает, что вызвано более высоким содержанием известняка и гидратов и меньшим содержанием магнетита. В соответствии с этим возрастает затрата теплоты при протекании эндо- и экзотермических реакций.

Для определения коэффициентов температуропроводности использован квазистационарный метод, основным достоинством которого является простота расчетных соотношений и возможность использования зависимости  $a = f(T)$  в режиме непрерывного нагрева. В данном исследовании использована методика, приведенная в работе [12]. Распределение температуры в начальный момент времени принято по параболе второго порядка. Изменение температуры поверхности во времени линейное. При этом расчет искомой величины проводили при помощи выражения для цилиндрического образца:

$$\theta(x, Fo) = \frac{\Delta T}{\Delta T_0} = \frac{1}{4} \frac{1}{Fo} \frac{b\tau}{\Delta T_0}, \quad (3)$$

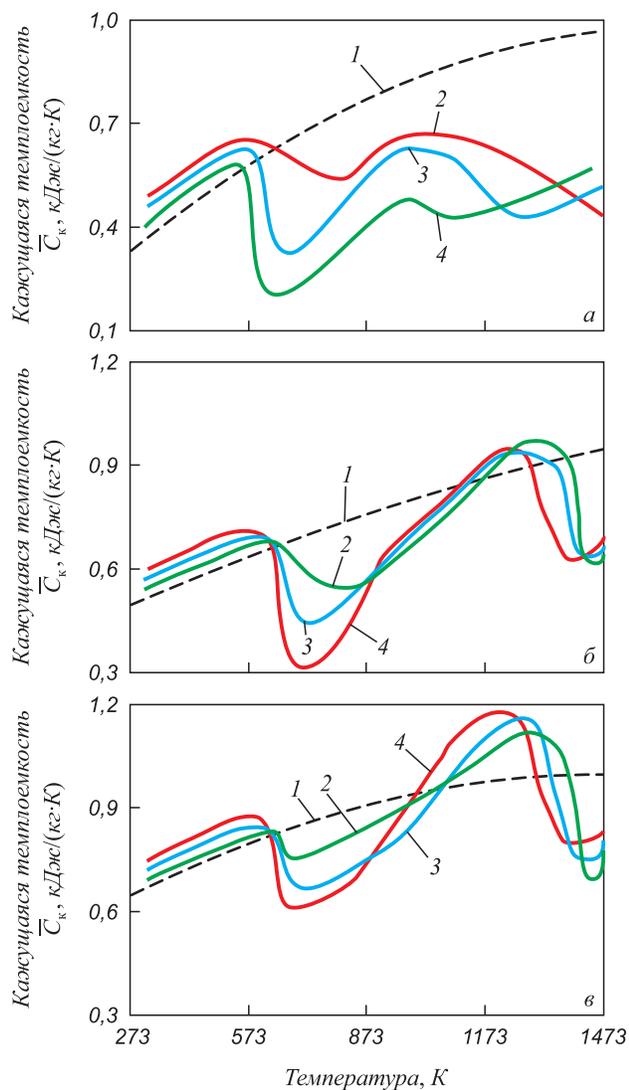


Рис. 1. Зависимости кажущейся теплоемкости окатышей основностью 0,3 (а), 1,3 (б) и 2,2 (в) от температуры:

1 –  $\bar{c}_k = f(T)$  и скорости нагрева, град/мин: 2 – 100; 3 – 50; 4 – 25

Fig. 1 Dependences of apparent heat capacity of the pellets with basicity of:

0.3 (a), 1.3 (b) and 2.2 (v) on the temperature

1 –  $\bar{c}_k = f(T)$  and the heating rate, deg/min: 2 – 100; 3 – 50; 4 – 25

где  $\theta$  – относительная температура;  $Fo = \alpha\tau/R^2$  – критерий Фурье;  $\Delta T$  и  $\Delta T_0$  – перепад температуры между поверхностью и центром в конце и в начале участка, К;  $b$  – скорость нагрева, град/с;  $\tau$  – время, с.

Поправки, учитывающие переменность скорости нагрева и зависимость коэффициента температуропроводности от температуры, находили по методике, которая описана в работе [13]. При линейной скорости нагрева и перепаде температуры по толщине цилиндра, не превышающей 15 град., величина поправки оказывается пренебрежимо малой.

При обработке результатов опытов термограммы нагрева образцов разбивали на малые участки, в пределах которых  $b = \text{const}$ . Определяя для каждого участка  $\Delta T/\Delta T_0$  и  $b\tau/\Delta T_0$ , можно по формуле (3) найти значение критерия  $Fo$  для любого участка термограммы, а из выражения  $Fo = \alpha\tau/R^2$  – коэффициент температуропроводности.

Размеры цилиндрических образцов в зависимости от скорости нагрева 25, 50 и 100 град/мин, составляющие соответственно:  $d = 14$  мм,  $H = 45$  мм;  $d = 12$  мм,  $H = 40$  мм;  $d = 10$  мм,  $H = 30$  мм выбирали из расчета соответствия диаметру окатышей заданного перепада температуры при обжиге. Высоту образцов, соответствующую  $H > 3d$ , определяли из условия минимума погрешности (около 1 %) при отходе от теоретической модели бесконечного цилиндра. Цилиндры получали путем прессования железорудного концентрата заданной основности при давлении 0,49 МПа. Плотность материала при этом оказалась близкой к плотности окатышей.

Результаты опытных данных приведены на рис. 2. Видно, что с повышением температуры коэффициент температуропроводности окатышей растет. Для температур 573 – 673 К это связано с началом окислительного процесса. Снижение величины коэффициента  $a$  в интервале температур 673 – 873 К связано с удалением гидратной влаги, а дальнейший подъем – с продолжением окислительного процесса. Для образцов с основностью 1,3 и 2,2 в интервале 1123 – 1223 К наблюдается резкое снижение коэффициента  $a$ , обусловленное процессом диссоциации известняка. В результате диссоциации увеличивается пористость образцов основностью 1,3 и 2,2, в связи с чем в дальнейшем идет более интенсивное окисление по сравнению с образцом основностью 0,3, в котором процесс окисления лимитируется внутренней диффузией кислорода. Для температур выше 1423 – 1473 К наблюдается снижение величины  $a$  из-за уменьшения количества остаточного магнетита и увеличения диффузионного сопротивления. Последнее обусловлено развитием процесса спекания, сопровождающегося снижением пористости материала.

С увеличением скорости нагрева кривые коэффициентов температуропроводности, аналогично кривым кажущейся теплоемкости, смещаются в область высоких температур.

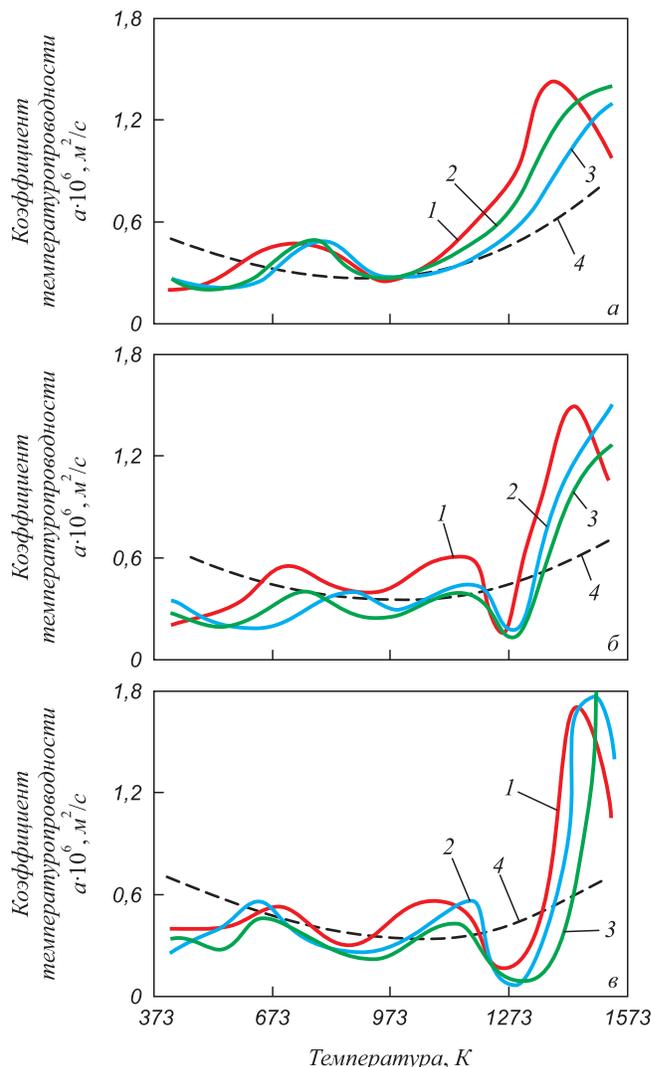


Рис. 2. Зависимости коэффициента температуропроводности окатышей основностью 0,3 (а), 1,3 (б) и 2,2 (в) от температуры и скорости нагрева, град/мин: 1 – 25; 2 – 50; 3 – 100; 4 – для обожженных окатышей

Fig. 2 Dependences of thermal diffusivity coefficient of the pellets with basicity of: 0.3 (a), 1.3 (b) and 2.2 (v) on the temperature and heating rate, deg/min:

1 – 25; 2 – 50; 3 – 100; 4 – for the fired pellets

Коэффициент теплопроводности определяли из выражения [14, 15]

$$\lambda = a\bar{c}_k\rho_k. \quad (4)$$

Зависимость кажущейся плотности образцов  $\rho_k$ , кг/м<sup>3</sup> от температуры определяли по изменению массы образца при обжиге. Зависимости коэффициента теплопроводности от температуры и скорости нагрева для окатышей с основностью 0,3, 1,3 и 2,2 показаны на рис. 3. С ростом степени офлюсования образцов коэффициент теплопроводности увеличивается. При температуре 1473 К коэффициенты теплопроводности, найденные для обожженных образцов основностью 0,3, 1,3 и 2,2, составляют соответственно 1,85, 1,71 и 1,75 Вт/(м·К).

По-видимому, при температуре 1573 К значения коэффициентов теплопроводности для исследуемых и обожженных образцов будут близки между собой и составят величину, равную 2,0 Вт/(м·К).

**Выводы.** С помощью известных методов определены теплофизические свойства (средняя физическая и кажущаяся теплоемкости, коэффициенты температур- и теплопроводности) качканарских титаномагнетитовых окатышей разной основности в зависимости от температуры и скорости нагрева в широком диапазоне изменения температур. Дано объяснение полученным зависимостям с учетом влияния на них процессов испарения влаги, декарбонизации и окисления. Полученные данные могут быть использованы для инженерных расчетов при проектировании новых обжиговых агрегатов, а также при оптимизации конструктивных и режимных параметров работы существующих.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Скуратов С.М., Колесов В.П., Воробьев А.Ф. Термохимия. Ч. 2. – М.: Издание МГУ, 1966. – 434 с.
2. Yur'ev B.P., Spirin N.A. Thermophysical properties of limestone and lime on heating // Steel in translation. 2012. Vol. 42. P. 308 – 311.
3. Yur'ev B.P., Spirin N.A. Thermophysical properties of slag-forming mixtures // Steel in translation. 2011. Vol. 41. P. 475 – 479.
4. Теоретические и практические основы теплофизических измерений / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко, А.Г. Дивин и др. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 408 с.
5. Фокин В.М., Ковылин А.В., Чернышов В.Н. Энергоэффективные методы определения теплофизических свойств строительных материалов и изделий. – М.: Издательский дом «Спектр», 2011. – 156 с.
6. Пономарев С.В., Балабанов П.В., Трофимов А.В. Оценка погрешности измерения теплофизических свойств твердых материалов // Измерительная техника. 2004. № 1. С. 44 – 47.
7. Cemushi F., Bison P.G., Figari A. etc. Thermal diffusivity measurements by photothermal and thermographic techniques // Int. J. Thermophys. 2004. Vol. 25. No. 2. P. 439 – 457.
8. Гуров А.В., Пономарев С.В. Измерение теплофизических свойств теплоизоляционных материалов методом плоского мгновенного источника теплоты. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 100 с.
9. Кузнецов Г.В., Кац М.Д. Теоретический анализ методических погрешностей определения теплофизических характеристик конструкционных материалов импульсным методом в образце конечных размеров // Измерительная техника. 2009. № 4. С. 34 – 36.
10. Ponomarev S.V., Mishenko S.V., Irvine T.F. Measurements of Thermophysical Properties by Laminar Flow Methods. – New York: Beggel House, Inc. Publishers, 2001. – 273 p.
11. Определение теплофизических свойств материалов металлургического производства / Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев, В.И. Матюхин и др. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 180 с.
12. Юрьев Б.П. Методика определения температуропроводности материалов в условиях нестационарной теплопроводности // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 12. С. 26 – 28.

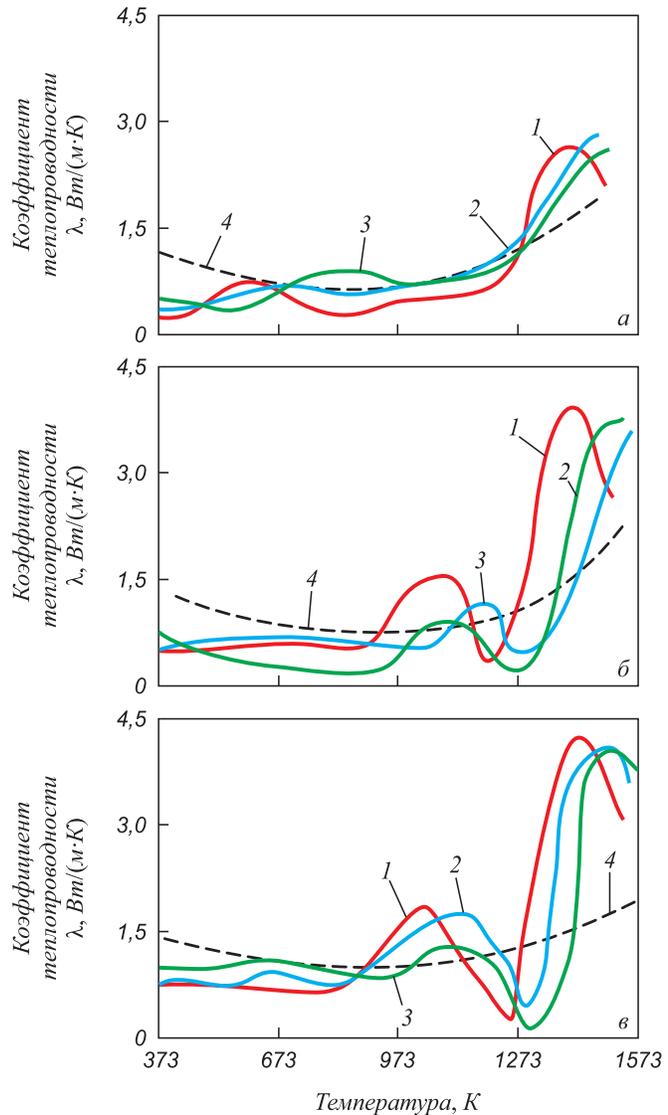


Рис. 3. Зависимости коэффициента теплопроводности окатышей основностью 0,3 (а), 1,3 (б) и 2,2 (в) от температуры и скорости нагрева, град/мин: 1 – 25; 2 – 50; 3 – 100; 4 – для обожженных окатышей

Fig. 3 Dependences of thermal conductivity coefficient of the pellets with basicity of: 0.3 (a), 1.3 (b) and 2.2 (v) on the temperature and heating rate, deg/min: 1 – 25; 2 – 50; 3 – 100; 4 – for the fired pellets

13. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А.Г. Шашков, Г.М. Волохов, Т.Н. Абраменко и др. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.
14. Карташев Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 2005. – 550 с.
15. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.

Поступила 3 июля 2015 г.

## THE STUDY OF THERMAL PROPERTIES OF TITANIUM-MAGNETITE KACHKANAR PELLETS

B.P. Yur'ev, V.A. Gol'tsev

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

**Abstract.** The thermo-physical properties of titanium-magnetite Kachkanar pellets of various basicity were carried out. Using the method of mixing, the dependence of the average physical specific heat of pellets under the temperature and phase composition was found. To find an apparent heat capacity of pellets the authors have used the gravimetric system with continuous registration of changes in the mass of pellet which provides the creation of an oxidizing or neutral atmosphere to separate the processes of oxidation and decarbonization. The coefficients of pellets thermal diffusivity were determined using a quasi-steady method enabling simple ratio calculation during continuous heating. The coefficients of thermal conductivity of the pellets were found from the equation connecting the density, heat capacity and thermal diffusivity coefficients. The results are of particular interest and can be used in the design of the new firing units, as well as the optimization of design and operational parameters of the existing ones.

**Keywords:** titanium-magnetite ore pellets, enthalpy, heat capacity, density, thermal diffusivity coefficient, thermal conductivity coefficient, basic, oxidation, dissociation, firing units.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-5-328-333

## REFERENCES

1. Skuratov S.M., Kolesov V.P., Vorob'ev A.F. *Termokhimiya. Part. 2* [Thermochemistry]. Moscow: Izdanie MGU, 1966, 434 p. (In Russ.).
2. Yur'ev B.P., Spirin N.A. Thermophysical properties of limestone and lime on heating. *Steel in Translation*. 2012, vol. 42, Issue 4, pp. 308–311.
3. Yur'ev B.P., Spirin N.A. Thermophysical properties of slag-forming mixtures. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, Issue 6, pp. 475–479.
4. Ponomarev S.V., Mishchenko S.V., Divin A.G., Vetrogradskii V.A., Churikov A.A. *Teoreticheskie i prakticheskie osnovy teplofizicheskikh izmerenii: monografiya* [Theoretical and practical bases of thermal measurements: Monograph]. Moscow: FIZMATLIT, 2008, 408 p. (In Russ.).
5. Fokin V.M., Kovylin A.V., Chernyshov V.N. *Energoeffektivnye metody opredeleniya teplofizicheskikh svoystv stroitel'nykh materialov i izdelii* [Energy-efficient methods for the determination of thermal properties of building materials and products]. Moscow: Izdatel'skii dom "Spektr", 2011, 156 p. (In Russ.).
6. Ponomarev S.V., Balabanov P.V., Trofimov A.V. An estimate of the errors in measuring the thermal properties of solids. *Measurement Techniques*. 2004, vol. 47, no. 1, pp. 66–72.
7. Cemushi F., Bison P.G., Figari A., Marinetti S., Grinzato E. Thermal diffusivity measurements by photothermal and thermographic techniques. *Int. J. Thermophys.* 2004, vol. 25, no. 2, pp. 439–457.
8. Gurov A.V., Ponomarev S.V. *Izmerenie teplofizicheskikh svoystv teploizolyatsionnykh materialov metodom ploskogo mgnovennogo istochnika teploty: monografiya* [The measurement of thermal properties of thermal insulation materials by flat instant heat source: Monograph]. Tambov: Izd-vo TGTU, 2013, 100 p. (In Russ.).
9. Kuznetsov G.V., Kats M.D. A theoretical analysis of the systematic errors in determining the thermal characteristics of structural materials by a pulse method in a sample of finite dimensions. *Measurement Techniques*. 2009, vol. 52, no. 4, pp. 384–387.
10. Ponomarev S.V., Mishenko S.V., Irvine T.F. *Measurements of Thermophysical Properties by Laminar Flow Methods*. New York: Begel House, Inc. Publishers, 2001, 273 p.
11. Yur'ev B.P., Gol'tsev V.A., Matyukhin V.I., Matyukhin O.V., Sheshukov O.Yu. *Opreделение teplofizicheskikh svoystv materialov metallurgicheskogo proizvodstva* [Determination of thermophysical properties of materials of metallurgical production]. Ekaterinburg: OOO "UIPTs", 2014, 180 p. (In Russ.).
12. Yur'ev B.P. Thermal diffusivity determination method for non-stable heat conduction. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 12, pp. 26–28. (In Russ.).
13. Shashkov A.G., Volokhov G.M., Abramenko T.N. etc. *Metody opredeleniya teploprovodnosti i temperaturoprovodnosti* [Methods for determining thermal conductivity and thermal diffusivity]. Moscow: Energiya, 1973, 336 p. (In Russ.).
14. Kartashev E.M. *Analiticheskie metody v teorii teploprovodnosti tverdykh tel* [Analytical methods in the theory of heat conduction of solids]. Moscow: Vysshaya shkola, 2005, 550 p. (In Russ.).
15. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conduction]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 600 p. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was supported by the Act 211 of the Government of the Russian Federation, contract no. 02.A03.21.0006.

**Information about the authors:**

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

**V.A. Gol'tsev**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy"  
(urfu.pervouralsk@gmail.com)

Received June 3, 2015

УДК 621.74.047.06:001

## ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА МЕХАНИЗМА КАЧЕНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА МНЛЗ

**Сотников А.Л.**, к.т.н., доцент кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии»,  
начальник научно-исследовательской части (m-lab@ukr.net)

Донецкий национальный технический университет  
(283001, Донецк, ул. Артема, 58)

**Аннотация.** Разработан виброметрический метод диагностирования разрушения эксцентрикового вала привода механизма качания кристаллизатора машины непрерывного литья заготовок на основе исследования влияния усталостного разрушения вала на амплитудно-частотную характеристику и уровень вибрации механизма качания. Используя теорию Шенли для определения текущей длины трещины эксцентрикового вала, была выведена зависимость изменения жесткости вала во времени. Исследования данной зависимости показали, что уменьшение жесткости вала приводит к росту суммарного уровня вибрации и спектра колебаний привода механизма качания. Полученные результаты позволили установить границы различия состояния (целостности) эксцентрикового вала привода механизма качания кристаллизатора по уровню вибрации в зависимости от частоты вращения вала двигателя на основе ГОСТ ИСО 10816-1-97. Предложенный виброметрический метод диагностирования привода механизма качания кристаллизатора ориентирован на применение широко доступных портативных анализаторов вибрации.

**Ключевые слова:** эксцентриковый вал, трещина, механизм качания кристаллизатора, машина непрерывного литья заготовок, анализатор вибрации, теория Шенли, метод диагностирования, вибродиагностика.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-5-334-338

В процессе эксплуатации электромеханического привода шарнирно-рычажного механизма качания кристаллизатора (МКК) сортовой машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) происходит возникновение и развитие усталостного разрушения эксцентрикового вала, которое, если вовремя его не предупредить, может привести к аварийному разрушению вала с прекращением процесса непрерывной разливки стали по соответствующему ручью машины. Как правило, причина возникновения усталостного разрушения эксцентрикового вала заключается в нарушении технологии сборки и монтажа привода МКК. Эффективным методом предупреждения возникновения на ранней стадии и развития неисправностей является диагностирование и входной контроль оборудования МНЛЗ, нового перед вводом в эксплуатацию или восстановленного после ремонта. В связи с этим актуальной задачей является разработка методов диагностирования привода МКК для предупреждения усталостного разрушения эксцентрикового вала.

Диагностирование МКК направлено на выявление причин отклонения фактических параметров колебательного движения кристаллизатора МНЛЗ от заданных значений, а также на наличие дефектов в деталях, являющихся результатом, в первую очередь, усталостного разрушения.

Несмотря на простоту и прочность (статическую и динамическую) конструкции шарнирно-рычажных

МКК, разработки как «Danieli & C. Officine Meccaniche S.p.A.» (Италия), так ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» (Краматорск, Украина), эти конструкции имеют уязвимые места, а именно подшипники шарниров рычажного механизма и эксцентриковый вал привода. Износ подшипников шарниров приводит к значительным отклонениям параметров колебательного движения кристаллизатора МНЛЗ, в результате чего увеличивается вероятность прорыва непрерывнолитого слитка под кристаллизатором, снижается стойкость гильзы кристаллизатора [1] и качество поверхности получаемых заготовок, а также нарушается стабильность процесса разливки стали на МНЛЗ. Разрушение эксцентрикового вала в процессе разливки стали на МНЛЗ является аварийным отказом, в результате которого прекращается разливка с возможным прорывом слитка под кристаллизатором.

Методы диагностирования подшипников шарниров МКК конструкции «Danieli & C. Officine Meccaniche S.p.A.» были разработаны автором в работе [2]. Основаны данные методы на измерении и анализе параметров вибрации МКК [3 – 5].

Разработкой же методов диагностирования технического состояния привода МКК для предупреждения разрушения его эксцентрикового вала никто из исследователей не занимался.

Известно, что в процессе эксплуатации привода МКК в ответ на изменение технического состояния его

деталей и узлов изменяется амплитудно-частотная характеристика привода. Данное свойство амплитудно-частотной характеристики можно использовать для диагностирования, в частности, технического состояния эксцентрикового вала привода МКК.

Разработанная в работе [6] динамическая модель привода МКК ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» позволяет провести исследование влияния на амплитудно-частотную характеристику и уровень вибрации привода разрушения его эксцентрикового вала. При этом разрабатываемые методы диагностирования и контроля должны быть доступны для их реализации в производственных условиях силами обслуживающего персонала МНЛЗ, а также обладать достаточной точностью и достоверностью результатов.

Целью настоящей работы является разработка метода диагностирования технического состояния электро-механического привода МКК на основе исследования влияния на амплитудно-частотную характеристику и уровень вибрации привода механизма качания разрушения его эксцентрикового вала.

Разрушение эксцентрикового вала привода МКК происходит в результате накопления усталостных повреждений при воздействии циклических изгибных напряжений при вращении вала с умеренными напряжениями и наличием локальных концентраторов напряжения [7, 8].

При моделировании разрушения эксцентрикового вала с помощью динамической модели привода МКК [6] полагалось, что развитие трещины в консольной части вала приводит к уменьшению диаметра вала  $d_0$  в опасном сечении, что в свою очередь уменьшает его жесткость. Изменение жесткости во времени описывается следующей зависимостью [9]:

$$k_b(\tau) = k_b(0) \left( \frac{d(\tau)}{d_0} \right)^4; \quad d(\tau) = d_0 - l_{тр}(\tau),$$

где  $k_b(0) = k_{10}$  – исходная жесткость вала при отсутствии в нем трещины;  $d_0 = 49$  мм – исходный диаметр вала в опасном сечении;  $d(\tau)$  – текущий диаметр вала;  $l_{тр}(\tau)$  – текущая длина трещины;  $\tau$  – текущее время с момента зарождения трещины и до разрушения эксцентрикового вала.

Тогда в окончательном виде получим:

$$k_b(\tau) = k_b(0) \left( 1 - \frac{l_{тр}(\tau)}{d_0} \right)^4.$$

Текущая длина трещины рассчитывается на основе теории Шенли [10 – 12] по зависимости

$$l_{тр}(\tau) = d'e^{\ln 1000 \left( \frac{\tau}{T} - 1 \right)},$$

где  $d'$  – диаметр, равный критической длине трещины  $l_{кр}$ , при которой происходит разрушение эксцентрикового вала (в расчете полагалось, что  $d' = d_0$ );  $T$  – наработка вала до разрушения;  $\tau/T$  – относительная наработка эксцентрикового вала привода МКК (изменяющаяся от 0 до 1).

Из результатов исследования амплитудно-частотной характеристики привода МКК при усталостном разрушении эксцентрикового вала, приведенных на рис. 1, следует, что уменьшение жесткости консольной части вала приводит к росту суммарного уровня вибрации редуктора привода МКК примерно в 5 раз. Соответственно изменяется и спектр колебаний (частота его максимума понижается), что является следствием уменьшения суммарной жесткости крепления привода, равной при разрушении эксцентрикового вала жесткости сайлентблока качающейся платформы (рис. 2). Резонансная частота привода при этом снижается с 65 до 20 Гц (в момент разрушения вала), а уровень вибрации в абсолютных значениях повышается с 0,25 до 1,5 мм/с при работе привода с частотой вращения вала двигателя 400 об/мин.

Из графика на рис. 3 следует, что при наработке, составляющей 80 % срока службы дефектного эксцентрикового вала  $T_{долг}$ , трещина занимает 25 % его диаметра. В пересчете на площадь поперечного сечения вала это означает, что порядка 44 % сечения уже «не работает». Это, в свою очередь, приводит к росту в 1,44 раза напряжений, действующих в незатронутом трещиной сечении вала. Учитывая, что типовые запасы прочности в металлургическом машиностроении имеют порядок  $K_{зап} = 1,5 - 2,0$  [7], это свидетельствует о том, что напряжения в опасном сечении вала достигают предельно допустимого уровня. Данное обстоятельство и является

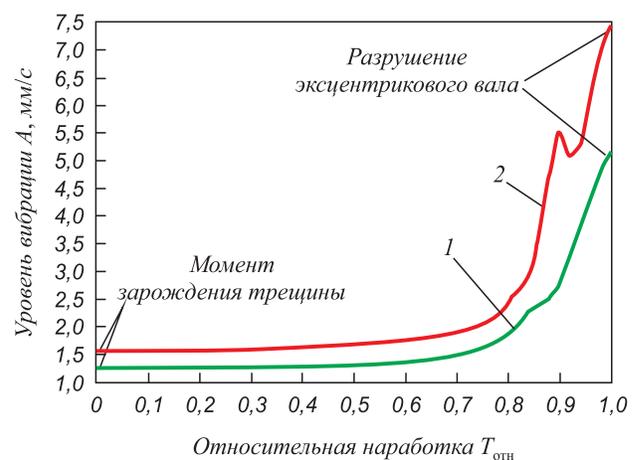


Рис. 1. Изменение суммарного уровня вибрации привода МКК по мере развития трещины в консольной части эксцентрикового вала при  $n$ , об/мин: 1 – 400; 2 – 1200

Fig. 1. Change of total vibration level of the MOM drive at the crack formation in the eccentric shaft console: 1 – 400; 2 – 1200

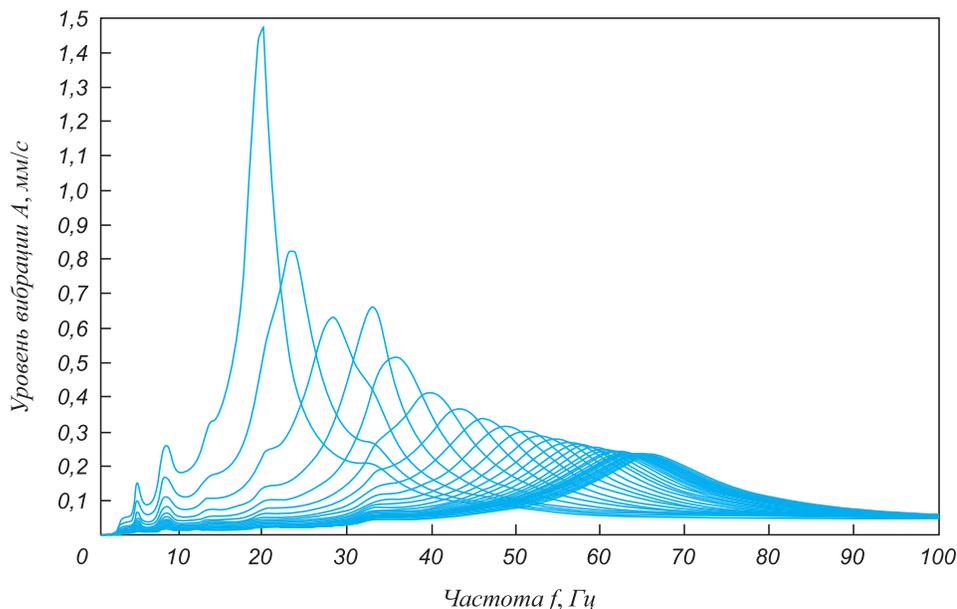


Рис. 2. Изменение спектра вибрации привода МКК по мере развития трещины в консольной части эксцентрикового вала при частоте вращения вала двигателя 400 об/мин

Fig. 2. Change of the vibration spectrum of the MOM drive at the crack formation in the console of the eccentric shaft at the rotational speed of the motor shaft of 400 rpm

причиной возрастания скорости развития трещины на заключительных (предаварийном и аварийном) этапах эксплуатации привода МКК, изменяющемся в пределах  $(0,8 - 1,0)T_{\text{долг}}$ .

Полученные результаты исследования позволяют определить границы различения технического состояния (целостности) эксцентрикового вала по общему уровню вибрации привода МКК (рис. 4, табл. 1, 2).

Учитывая то, что развитие трещины эксцентрикового вала на заключительных (предаварийном и аварийном) этапах эксплуатации привода МКК происходит практически мгновенно, рекомендуется использовать

коэффициент, определяющий границы классов технического состояния вала, равный 1,5, вместо общепринятого 2 согласно ГОСТ ИСО 10816-1-97.

Для верификации разработанной диагностической модели привода МКК и полученных результатов исследования резонансных явлений и уровня вибрации при изменении технического состояния эксцентрикового вала привода были проведены экспериментальные измерения общего уровня вибрации действующего привода МКК ПАО «Новокраматорский машиностроительный

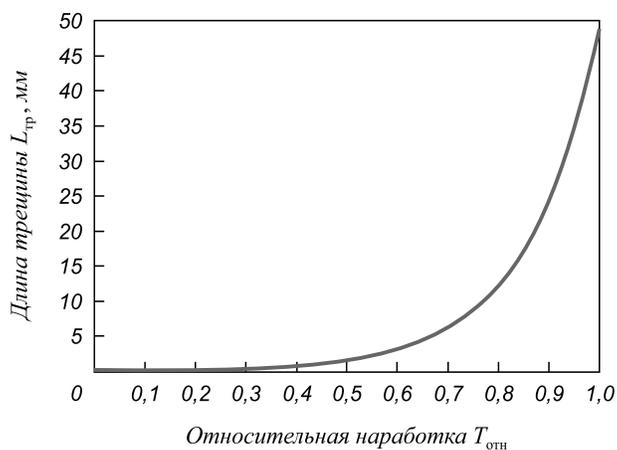


Рис. 3. Изменение длины трещины по мере разрушения эксцентрикового вала

Fig. 3. Change of crack length in the process of destruction of eccentric shaft

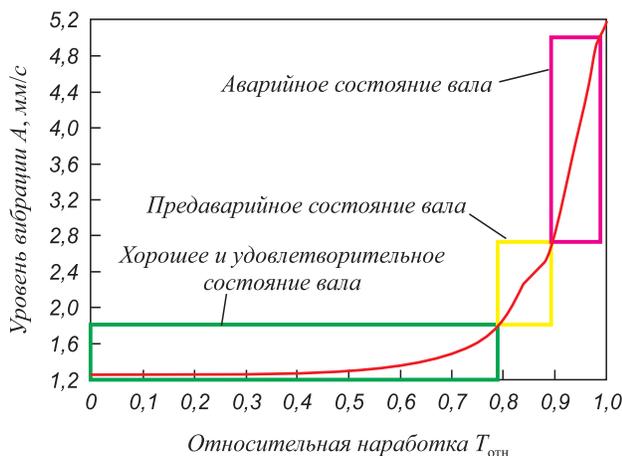


Рис. 4. Границы различения состояния (целостности) эксцентрикового вала по общему уровню вибрации привода МКК на частоте вращения вала двигателя 400 об/мин

Fig. 4. Discernment boundaries of status (integrity) of the eccentric shaft by the vibration level of the MOM drive at the rotational speed of the motor of 400 rpm

Таблица 1

**Границы различения состояния (целостности) эксцентрикового вала по виброскорости привода МКК, мм/с**

*Table 1. Discernment boundaries of status (integrity) of the eccentric shaft by the vibration speed of the MOM drive, mm/s*

Класс технического состояния	Частота вращения вала двигателя, об/мин	
	400	1200
Хорошее	< 1,2	< 1,5
Удовлетворительное	1,2 – 1,8	1,5 – 2,25
Неудовлетворительное (предаварийное)	1,8 – 2,7	2,25 – 3,38
Аварийное	> 2,7	> 3,38

завод» при изменении частоты вращения вала двигателя. В качестве точек измерения параметров вибрации были выбраны точки, расположенные на подшипниковых опорах редуктора и двигателя. Контролируемый частотный диапазон составлял до 1000 Гц, измеряемые параметры вибрации – среднее квадратичное значение виброскорости, временная форма сигнала. Измерения проводились для частот вращения двигателя 400, 800, 1200 и 1600 об/мин.

В качестве измерительного средства был применен анализатор вибрации СД-21 [13–15].

Результаты экспериментального исследования подтвердили точность выполненного нормирования режимов работы и общего уровня вибрации привода МКК и показали достоверность и эффективность разработанного метода диагностирования состояния привода.

**Выводы.** В ходе исследования изменения амплитудно-частотной характеристики привода МКК МНЛЗ при развитии трещины в консольной части эксцентрикового вала установлены границы различения состояния (целостности) вала по уровню вибрации привода в зависимости от частоты вращения вала двигателя на основе ГОСТ ИСО 10816-1-97.

Рекомендуется коэффициент различения границ классов технического состояния эксцентрикового вала по уровню вибрации привода МКК принимать равным 1,5 вместо 2, регламентированного в ГОСТ ИСО 10816-1-97, учитывая мгновенный характер разрушения вала на предаварийном и аварийном этапах эксплуатации.

Разработанный метод диагностирования привода МКК можно реализовать как с применением портативных анализаторов вибрации и виброметров, так и с помощью стационарных систем мониторинга и диагностики. В последнем случае повышается эффективность диагностирования за счет непрерывного отслеживания

Таблица 2

**Нормированные уровни вибрации привода МКК в зависимости от частоты вращения вала двигателя**

*Table 2. Normalized vibration levels of the MOM drive depending on the rotational speed of the motor shaft*

Виброскорость, мм/с	Частота вращения вала двигателя, об/мин	
	400	1200
1,2	A	A
1,5	B	A
1,8		B
2,25	C	B
2,7		C
3,38	D	C
4,05		D
7,07		D

Примечание. Обозначение зон вибрационного состояния привода (A–D) принято в соответствии с ГОСТ ИСО 10816-1-97.

изменений технического состояния деталей, узлов и механизмов МКК.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Radyuk A.G., Gorbatyuk S.M., Gerasimova A.A. Use of electric arc metallization to recondition the working surfaces of the narrow walls of thick-walled slab molds // Metallurgist. 2011. Vol. 55(5–6). P. 419–423.
2. Сотников А.Л. Предупреждение отклонений параметров колебательного движения кристаллизатора МНЛЗ на основе развития методов диагностики механизма качания: Дис. ... канд. техн. наук. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 205 с.
3. Сотников А.Л. Диагностическая модель подшипниковых узлов механизма качания кристаллизатора МНЛЗ // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. 2008. № 4 (15). С. 48–54.
4. Сотников А.Л. Виброметрический метод диагностирования подшипников рычажного механизма кристаллизатора МНЛЗ // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. 2010. № 3 (22). С. 27–32.
5. Субботин Г., Пустошный Д., Попов В. Вибродиагностика подшипников эксцентриковых валов механизмов качания кристаллизаторов // НМ-Оборудование. 2007. № 2. С. 19–23.
6. Сотников А.Л., Нагорный В.М., Оробцев А.Ю. и др. Нормирование режимов работы и уровня вибрации механизма качания кристаллизатора МНЛЗ // Metallургические процессы и оборудование. 2013. № 1. С. 44–54.
7. Гребеник В.М., Цапко В.К. Надежность металлургического оборудования (оценка эксплуатационной надежности и долговечности): Справочник. – М.: Металлургия, 1980. – 344 с.
8. Детали машин и основы конструирования: Учебник / С.М. Горбатюк, А.Н. Веремеевич, С.В. Албул и др.; Под ред. С.М. Горбатюка. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2014. – 377 с.
9. Жернаков В.С., Куликов В.С., Мардимасова Т.Н. Расчет валов на статическую, усталостную прочность и жесткость: Учеб. пособие. – Уфа: УГАТУ, 2003. – 76 с.
10. Залюга В.А., Нагорный В.В. Расчет индикаторов разрушения режущего инструмента / Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. 2012. № 2. С. 101–111.

11. Кренделл С. Случайные колебания: Пер. с англ. – М.: Мир, 1967. – 356 с.
12. Shanley F.R. A theory of fatigue based on unbonding during reversed slip // Report No. P-350. – Santa Monica (USA): The RAND Corporation, 1952. – 93 p.
13. Виброанализатор СД-21. Руководство по эксплуатации. – СПб: ООО «Ассоциация ВАСТ», 2009. – 111 с.
14. Смирнов А.Н., Антыкуз О.В. Комплексный контроль параметров качения кристаллизаторов МНЛЗ / *Металл и литье Украины*. 2009. № 1 – 2. С. 57 – 61.
15. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин. – М.: Машиностроение, 1999. – 344 с.

Поступила 9 апреля 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 5, PP. 334–338.

## DIAGNOSTICS OF ELECTROMECHANICAL DRIVE OF THE CCM MOLD OSCILLATION MECHANISM

*A.L. Sotnikov*

**Donetsk National Technical University, Donetsk**

**Abstract.** The vibrometry method of diagnosing the destruction of the eccentric shaft of the oscillation mechanism drive of the continuous casting machine mold was developed based on the research of influence of fatigue fracture of the shaft on the amplitude-frequency characteristic and the vibration level of the oscillation mechanism. Using the Shengli theory to determine the current crack length of the eccentric shaft, the dependence of the shaft stiffness variation with time was derived. The study of this dependence has shown that decreasing shaft stiffness leads to the increase of total vibration level and spectrum of fluctuations of the drive of mold oscillation mechanism. The obtained results allowed to establish the discernment boundaries of status (integrity) of the eccentric shaft of the drive of the mold oscillation mechanism by the vibration level depending on the rotational speed of the motor shaft on the basis of GOST ISO 10816-1-97. The proposed vibrometry method for diagnosing the drive of the CCM mold mechanism is focused on the use of widely available portable vibration analyzers.

**Keywords:** eccentric shaft, crack, mold oscillation mechanism, continuous casting machine, vibration analyzer, Shengli theory, method of diagnosing, vibration diagnostics.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-5-334-338

### REFERENCES

1. Radyuk A.G., Gorbatyuk S.M., Gerasimova A.A. Use of electric-arc metallization to recondition the working surfaces of the narrow walls of thick-walled slab molds. *Metallurgist*. 2011, vol. 55, Issue 5–6, pp. 419–423.
2. Sotnikov A.L. *Preduprezhdenie otklonenii parametrov kolebatelnogo dvizheniya kristallizatora MNLZ na osnove razvitiya metodov diagnostiki mekhanizma kachaniya: dis. kand. tekhn. nauk* [The prevention of parameters divergence of oscillatory movement of CC machine crystallizer on the basis of development of tilting mechanism diagnostics techniques: Cand. Sci. Diss.]. Donetsk: DonNTU, 2008, 205 p. (In Russ.).
3. Sotnikov A.L. The diagnostic model for the bearing units of CCM mold oscillation mechanism. *Vibratsiya mashin: izmerenie, snizhenie, zashchita*. 2008, no. 4 (15), pp. 48–54. (In Russ.).
4. Sotnikov A.L. The vibrometry method of diagnosing the bearings of the mold lever mechanism. *Vibratsiya mashin: izmerenie, snizhenie, zashchita*. 2010, no. 3 (22), pp. 27–32. (In Russ.).
5. Subbotin G., Pustoshnyi D., Popov V. Vibration diagnostics of the bearings of the eccentric shafts of the CCM mold oscillation mechanism. *NM-Oborudovanie*. 2007, no. 2, pp. 19–23. (In Russ.).
6. Sotnikov A.L., Nagornyi V.M., Orobtssev A.Y., Ptukha S.V., Rodionov N.A. Regulation of operating modes and vibration level of the CCM mold oscillating mechanism. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie*. 2013, no. 1, pp. 44–54. (In Russ.).
7. Grebenik V.M., Tsapko V.K. *Nadezhnost' metallurgicheskogo oborudovaniya (otsenka ekspluatatsionnoi nadezhnosti i dolgovechnosti)*. *Spravochnik* [The reliability of metallurgical equipment (evaluation of operational reliability and durability). Guide]. Moscow: Metallurgiya, 1980, 344 p. (In Russ.).
8. Gorbatyuk S.M. et al. *Detali mashin i osnovy konstruirovaniya: uchebnyk* [Machine parts and design fundamentals: Textbook]. Gorbatyuk S.M. ed. Moscow: Izd. Dom MISiS, 2014, 377 p. (In Russ.).
9. Zhernakov V.S., Kulikov V.S., Mardimasova T.N. *Raschet valov na staticheskuyu, ustalostnuyu prochnost' i zhestkost'*: *Uchebnoe posobie* [Calculation of shafts for static, fatigue strength and stiffness: Tutorial]. Ufa: UGATU, 2003, 76 p. (In Russ.).
10. Zaloga V.A., Nagornyi V.V. Calculation of indicators of destruction of the cutting tool. *Visnik SumDU. Seriya Tekhnichni nauki*. 2012, no. 2, pp. 101–111. (In Russ.).
11. Crandall S.H., Mark W.D. *Random Vibrations in Mechanical Systems*. Academic Press, New York, 1963. (Russ.ed.: Crandall S. *Sluchainye kolebaniya*. Moscow: Mir, 1967, 356 p.).
12. Shanley F.R. *A theory of fatigue based on unbonding during reversed slip / The RAND Corporation. Report, no. P-350*. Santa Monica (USA): The RAND Corporation, 1952, 93 p.
13. *Vibroanalizator SD-21. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Vibration analyzer SD-21. Manual]. St. Petersburg: ООО «Ассоциация ВАСТ», 2009, 111 p. (In Russ.).
14. Smirnov A.N., Antykuz O.V. Comprehensive parameter control of CCM mold oscillation. *Metall i lit'e Ukrainy*. 2009, no. 1–2, pp. 57–61. (In Russ.).
15. Gol'din A.S. *Vibratsiya rotornykh mashin* [Vibration of rotor machines]. Moscow: Mashinostroenie, 1999, 344 p. (In Russ.).

### *Information about the authors:*

*A.L. Sotnikov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgy Plants”, Head of the Research Department (m-lab@ukr.net)*

Received April 9, 2016

УДК 536.2.01

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ\*

**Еремин А.В.**, к.т.н., доцент кафедры «Теоретические основы теплотехники  
и гидромеханика» (a.v.eremin@list.ru)

**Стефанюк Е.В.**, д.т.н., профессор кафедры «Теоретические основы теплотехники  
и гидромеханика» (totig@yandex.ru)

**Абишева Л.С.**, ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники и гидромеханика»

Самарский государственный технический университет  
(443100, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, 244)

**Аннотация.** На основе определения фронта температурного возмущения и дополнительных граничных условий получено приближенное аналитическое решение задачи теплопроводности для бесконечной пластины при граничных условиях третьего рода с переменным во времени источником теплоты. Процесс теплопроводности разделяется на две стадии по времени, что позволяет находить простые по форме аналитические решения для каждой из них в отдельности. Получаемые решения представляются в форме алгебраических степенных рядов с зависящими от времени коэффициентами, определяемыми из основных и дополнительных граничных условий. Дополнительные граничные условия находятся в таком виде, чтобы их выполнение искомым решением было эквивалентно выполнению дифференциального уравнения краевой задачи во всем диапазоне изменения временной и пространственной переменных. Эти условия задаются в граничных точках и на фронте температурного возмущения. Таким путем можно получать аналитические решения во всем диапазоне времени нестационарного процесса, включая малые и сверхмалые его значения, практически с заданной степенью точности. Полученное в настоящей работе аналитическое решение было использовано для идентификации переменного во времени источника теплоты путем решения обратной задачи теплопроводности.

**Ключевые слова:** задача теплопроводности, бесконечная пластина, переменный во времени источник теплоты, интегральный метод, фронт температурного возмущения, дополнительные граничные условия, идентификация источника теплоты.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-5-339-346

Во многих случаях теплообмен в твердых телах может происходить при наличии внутренних источников теплоты, которые могут возникать за счет протекания тока в проводнике, нахождения тела в электромагнитном поле, воздействия ультразвуковых высокочастотных колебаний, полиморфных превращений в металлах при изменении температуры и др. [1 – 3]. Важной проблемой является разработка методов получения простых по форме аналитических (приближенных аналитических) решений таких задач с целью их использования для идентификации (восстановления) источников теплоты, физических свойств среды, краевых условий и прочее путем решения обратных задач теплопроводности. Известные точные аналитические решения указанных задач выражаются сложными бесконечными функциональными рядами, плохо сходящимися в окрестности малых и особенно сверхмалых значений временной и пространственной координат, что приводит к практической невозможности их использования для решения обратных задач теплопроводности [4 – 10].

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания ФГБОУ ВО «СамГТУ» (код проекта: 1273).

Рассмотрим задачу теплопроводности для бесконечной пластины при симметричных граничных условиях третьего рода с переменным во времени источником теплоты в следующей математической постановке:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\omega(\tau)}{c\rho}; \quad (\tau > 0; 0 < x < \delta); \quad (1)$$

$$T(x, 0) = T_0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T(\delta, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\lambda \partial T(0, \tau)}{\partial x} - \alpha [T(0, \tau) - T_{cp}] = 0, \quad (4)$$

где  $T$  – температура;  $x$  – координата;  $\tau$  – время;  $a$ ,  $\lambda$ ,  $\alpha$  – коэффициенты температуропроводности, теплопроводности, теплоотдачи соответственно;  $\omega(\tau) = \omega_0(1 + \beta\tau)$  – мощность внутреннего источника теплоты;  $\beta = \text{const}$ ;  $c$  – теплоемкость;  $\rho$  – плотность;  $T_0$  – начальная температура;  $T_{cp}$  – температура среды;  $\delta$  – половина толщины пластины.

Трудности получения и использования известных точных аналитических решений задачи (1) – (4) заключаются в том, что собственные числа краевой задачи определяются из трансцендентных уравнений, решение которых может быть получено лишь численными (или графическими) методами. Собственные числа не могут быть представлены в виде некоторой формулы в зависимости от числа приближений, что снижает ценность известных решений как аналитических. Например, решение обратных задач теплопроводности в данном случае практически не представляется возможным.

Для получения более простого аналитического решения задачи (1) – (4) воспользуемся методом, основанном на определении фронта температурного возмущения и дополнительных граничных условий [11 – 15].

Введем следующие безразмерные переменные и параметры:

$$\Theta = \frac{T - T_0}{T_{cp} - T_0}; \quad Bi = \frac{\alpha \delta}{\lambda}; \quad Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}; \quad \xi = \frac{x}{\delta};$$

$$Po = \frac{\beta \delta^2 Po_1}{a}; \quad Po_1 = \frac{\omega_0 \delta^2}{ac\rho(T_{cp} - T_0)}.$$

Используя понятие фронта температурного возмущения, разделим процесс теплообмена на две стадии по времени:  $0 \leq Fo \leq Fo_1$  и  $Fo_1 \leq Fo < \infty$ , где  $Fo_1$  – время достижения фронтом температурного возмущения координаты  $\xi = 1$ . Для этого введем движущуюся во времени границу (фронт температурного возмущения  $q_1(Fo)$ ), разделяющую исходную область  $0 \leq \xi \leq 1$  на две подобласти: возмущенную  $0 \leq \xi \leq q_1(Fo)$  и невозмущенную  $q_1(Fo) \leq \xi \leq 1$ , где  $q_1(Fo)$  – функция, определяющая продвижение границы раздела по координате  $\xi$  во времени. Первая стадия заканчивается при достижении подвижной границей координаты  $\xi = 1$  т. е. когда  $Fo = Fo_1$  (рис. 1).

Во второй стадии процесса изменение температуры происходит по всему объему тела  $0 \leq \xi \leq 1$ . Понятие фронта температурного возмущения в данном случае теряет смысл и в рассмотрение вводится дополнительная искомая функция  $q_2(Fo) = \Theta(1, Fo)$ , характеризующая изменение температуры во времени в точке  $\xi = 1$  (см. рис. 1).

Поскольку в параболическом уравнении теплопроводности (1) заложена бесконечная скорость распространения теплоты, то понятие фронта температурного возмущения в данном случае следует считать условным и используемым лишь как средство для получения простых по форме аналитических решений. Ниже будет показано, что с увеличением числа приближений  $n$  наряду с увеличением точности получаемого решения время  $Fo_1$  перемещения фронта теплового возмущения от поверхности до центра пластины уменьшается и в пределе при  $n \rightarrow \infty$   $Fo \rightarrow 0$ . Следовательно, описывае-

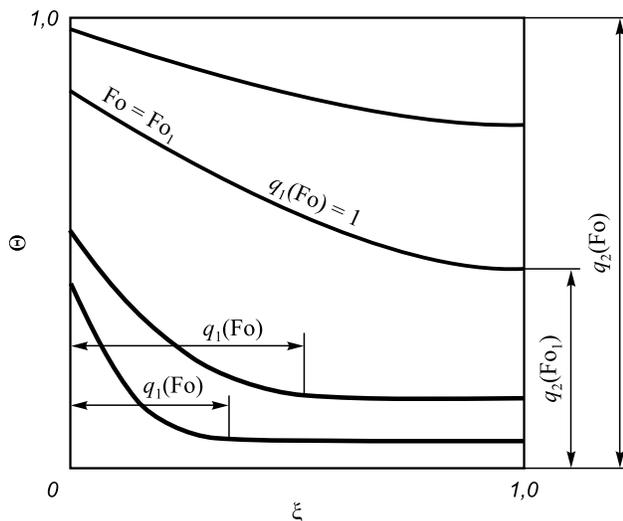


Рис. 1. Расчетная схема теплообмена

Fig. 1. Heat exchange scheme

мый получаемым решением процесс теплопроводности будет приближаться к процессу, протекающему с бесконечной скоростью распространения теплоты.

Математическая постановка задачи для первой стадии процесса имеет вид

$$\frac{\partial \Theta(\xi, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \Theta(\xi, Fo)}{\partial \xi^2} + PoFo + Po_1; \quad 0 \leq \xi < q_1(Fo); \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Theta(0, Fo)}{\partial \xi} - Bi[\Theta(0, Fo) - 1] = 0; \quad (6)$$

$$\Theta(q_1, Fo) = Q(Fo); \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Theta(q_1, Fo)}{\partial \xi} = 0. \quad (8)$$

Согласно уравнению (7) температура на фронте температурного возмущения определяется лишь действием источника теплоты, где  $Q(Fo)$  находится по уравнению

$$Q(Fo) = \int_0^{Fo} (PoFo + Po_1) dFo = 0,5PoFo^2 + Po_1Fo.$$

Отметим, что задача (5) – (8) не содержит начального условия для искомой функции  $\Theta(\xi, Fo)$ . Это связано с тем, что при  $Fo = 0$  задача (5) – (8) определена лишь в точке  $\xi = 0$ , где задается начальное условие  $q_1(Fo) = 0$ .

Решение задачи (5) – (8) принимается в виде

$$\Theta(\xi, Fo) = \sum_{k=0}^n a_k (q_1(Fo)) \xi^k, \quad (9)$$

где  $a_k(q_1(Fo))$  – неизвестные коэффициенты, определяемые из граничных условий (6) – (8). Подставляя (9), ог-

раничиваясь тремя членами ряда, относительно  $a_k(q_1)$  ( $k = 0, 1, 2$ ) будем иметь систему трех алгебраических линейных уравнений. После определения  $a_k(q_1)$  уравнение (9) принимает вид

$$\Theta(\xi, Fo) = \left[ Bi\xi(PoFo^2 + 2Po_1Fo - 2)(2q_1 - \xi) + 2q_1(2Po_1Fo + Biq_1 + Fo^2Po) \right] / \left[ 2q_1(Biq_1 + 2) \right]. \quad (10)$$

Рассмотрим случай, когда мощность внутреннего источника теплоты не зависит от времени ( $Po = 0$ ), а  $Bi \rightarrow \infty$  (граничное условие первого рода). Соотношение (10) при этом будет

$$\Theta(\xi, Fo) = \frac{\xi^2 - 2\xi q_1 + q_1^2 - FoPo_1\xi^2 + 2FoPo_1\xi q_1}{q_1^2}. \quad (11)$$

Для нахождения неизвестной функции  $q_1(Fo)$  составим невязку уравнения (5) и проинтегрируем ее в пределах толщины термического слоя  $0 \leq \xi \leq q_1(Fo)$ , т. е. составим интеграл теплового баланса, что эквивалентно осреднению уравнения (5)

$$\int_0^{q_1} \frac{\partial \Theta(\xi, Fo)}{\partial Fo} d\xi = \int_0^{q_1} \left( \frac{\partial^2 \Theta(\xi, Fo)}{\partial \xi^2} + PoFo + Po_1 \right) d\xi. \quad (12)$$

Подставляя (11) в (12), получаем

$$q_1^2 + \frac{6FoPo_1 - Po_1q_1^2 - 6}{q_1(FoPo_1 - 1)} = 0. \quad (13)$$

Решение уравнения (13) при начальном условии  $q_1(0) = 0$  имеет вид

$$q_1(Fo) = - \frac{2\sqrt{Po_1(-3Fo^2Po_1^2 + 3FoPo_1 - 1 + Fo^3Po_1^3)}}{Po_1(FoPo_1 - 1)}. \quad (14)$$

Соотношения (11), (14) представляют решение задачи (5) – (8) в первом приближении первой стадии процесса. Результаты расчетов температуры по формуле (11) при  $Po_1 = 50$  в сравнении с точным решением [4] представлены на рис. 2. Их анализ позволяет заключить, что отличие температур, полученных по формуле (11), в диапазоне  $10^{-7} \leq Fo \leq 0,015$  находится в пределах 1 – 8 %. При дальнейшем увеличении времени расхождение решений увеличивается и при  $Fo = 0,03$  составляет около 20 %. Отметим, что соотношение (11) точно удовлетворяет интегралу теплового баланса (12) и граничным условиям (6) – (8). Уравнение (5), как это следует из (12), в данном случае удовлетворяется лишь в среднем. Следовательно, повышение точности решения связано с улучшением выполнения уравнения (5), а для этого необходимо увеличивать число членов ряда (9), что приводит к увеличению количества неизвестных коэффициен-

тов  $a_k(q_1)$ . Для их определения совместно с основными используются дополнительные граничные условия [14, 15], которые во втором приближении первой стадии процесса записываются в виде

$$\frac{\partial^3 \Theta(0, Fo)}{\partial \xi^3} - Bi \left( \frac{\partial^2 \Theta(0, Fo)}{\partial \xi^2} + PoFo + Po_1 \right) = 0; \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 \Theta(q_1, Fo)}{\partial \xi^2} = 0; \quad (16)$$

$$\frac{\partial^3 \Theta(q_1, Fo)}{\partial \xi^3} = 0. \quad (17)$$

Для определения соотношений (15) – (17) используются дифференциальное уравнение (5) и граничные условия (6) – (8). Физический смысл дополнительных граничных условий состоит в том, что их выполнение искомым решением эквивалентно выполнению исходного дифференциального уравнения в граничных точках и на фронте температурного возмущения. Поскольку область определения фронта температурного возмущения представляет весь диапазон изменения пространственной переменной  $0 \leq \xi \leq 1$ , то, следовательно, чем большее число дополнительных граничных условий будет принято, тем лучше будет выполняться уравнение (5) внутри рассматриваемой области во всем диапазоне времени первой стадии процесса  $0 \leq Fo \leq Fo_1$ . Отметим, что дополнительные граничные условия не изменяют математическую постановку задачи (5) – (8). Они служат лишь вспомогательным средст-

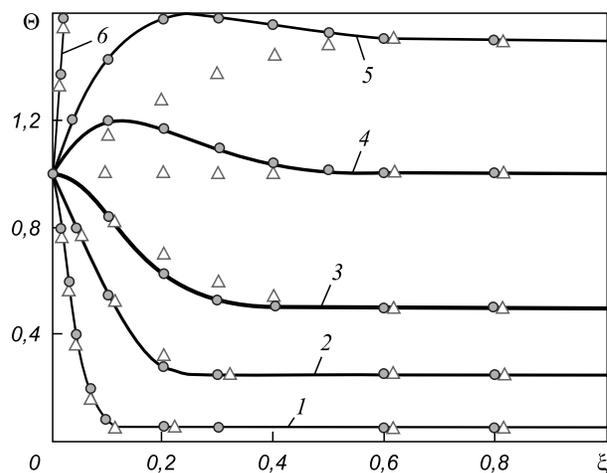


Рис. 2. Распределение безразмерной температуры в пластине с внутренними источниками теплоты (первая стадия процесса) ( $Bi \rightarrow \infty, Po = 0, Po_1 = 50$ ) при  $Fo$ :

1 – 0,001; 2 – 0,005; 3 – 0,01; 4 – 0,02; 5 – 0,03; 6 – 0,25; — — точное решение;  $\Delta$  – первое приближение;  $\bigcirc$  – второе приближение

Fig. 2. Distribution of the dimensionless temperature in a plate with inner heat sources (first stage of the process) ( $Bi \rightarrow \infty, Po = 0, Po_1 = 50$ ) at  $Fo$ :

1 – 0,001; 2 – 0,005; 3 – 0,01; 4 – 0,02; 5 – 0,03; 6 – 0,25; — — exact solution;  $\Delta$  – first approximation;  $\bigcirc$  – second approximation

вом для того, чтобы искомое решение вида (9) как можно лучше удовлетворяло уравнению (5).

Подставляя (9), ограничиваясь шестью членами ряда, в основные (6) – (8) и дополнительные (15) – (17) граничные условия, относительно  $a_k(q_1)$  получим цепочную систему алгебраических линейных уравнений. После определения из решения этой системы  $a_k(q_1)$  соотношение (9) принимает вид (при  $Po = 0; Bi \rightarrow \infty$ )

$$\begin{aligned} \Theta(\xi, Fo) = & 1 + \left[ 20(Po_1 Fo - 1) + Po_1 q_1^2 \right] \frac{\xi}{8q_1} - \\ & - 0,5Po_1 \xi^2 - \left[ 20(Po_1 Fo - 1) - 3Po_1 q_1^2 \right] \frac{\xi^3}{4q_1^3} + \\ & + \left[ 40(Po_1 Fo - 1) - 4Po_1 q_1^2 \right] \frac{\xi^4}{8q_1^4} + \\ & + \left[ 12(1 - Po_1 Fo) + Po_1 q_1^2 \right] \frac{\xi^5}{8q_1^5}. \end{aligned} \quad (18)$$

Подставляя (18) в интеграл теплового баланса (12) относительно неизвестной функции  $q_1(Fo)$  получаем следующее обыкновенное дифференциальное уравнение

$$q_1 q_1' - 10 = 0.$$

Его решение при начальном условии  $q_1(0) = 0$  имеет вид

$$q_1(Fo) = \sqrt{20 Fo}. \quad (19)$$

Соотношения (18), (19) представляют решение задачи (5) – (8) во втором приближении. Это решение точно удовлетворяет интегралу теплового баланса (12), основным (6) – (8) и дополнительным (15) – (17) граничным условиям. Отметим, что использование дополнительных граничных условий позволило значительно повысить точность решения, а, следовательно, и точность выполнения уравнения (5) по сравнению с первым приближением (см. рис. 2).

Положив в (19)  $q_1(Fo) = 1$ , находим время окончания первой стадии процесса  $Fo_1 = 0,05$ . Анализ уравнения (19) позволяет заключить, что внутренний источник теплоты не влияет на скорость перемещения фронта температурного возмущения. Графики перемещения фронта температурного возмущения в зависимости от числа приближений даны на рис. 3. Из их анализа следует, что с увеличением числа приближений время достижения фронтом температурного возмущения координаты  $\xi = 1$  уменьшается, а точность решения задачи возрастает и в пределе при  $n \rightarrow \infty Fo_1 \rightarrow 0$ , что свидетельствует о приближении решения к описанию бесконечной скорости распространения теплоты.

Для получения решения задачи (5) – (8) в третьем приближении к основным (6) – (8) и дополнительным (15) – (17) следует добавить еще следующие дополнительные граничные условия

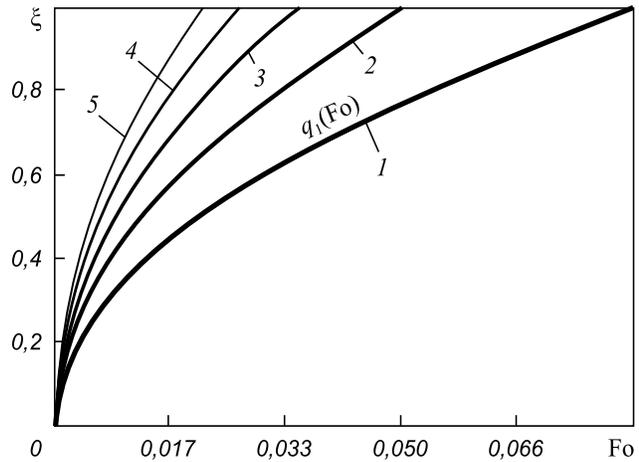


Рис. 3. Перемещение фронта температурного возмущения по координате  $\xi$  во времени  $Fo$ :  
1 – 5 – номер приближения

Fig. 3. Motion of the temperature perturbation front along the coordinate  $\xi$  at time  $Fo$ :  
1 – 5 – approximation number

$$\begin{aligned} \frac{\partial^5 \Theta(0, Fo)}{\partial \xi^5} - Bi \left( \frac{\partial^4 \Theta(0, Fo)}{\partial \xi^4} + Po \right) &= 0; \\ \frac{\partial^4 \Theta(q_1, Fo)}{\partial \xi^4} = 0; \quad \frac{\partial^5 \Theta(0, Fo)}{\partial \xi^5} &= 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Число членов ряда (9) в третьем приближении будет равно 9, где неизвестные коэффициенты  $a_k(q_1)$  ( $k = 0, 1, 2, \dots, 9$ ) находятся из основных (6) – (8) и дополнительных (15) – (17), (20) граничных условий. Дальнейший процесс получения решения такой же, как и во втором приближении.

Математическая постановка задачи для второй стадии процесса имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta(\xi, Fo)}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \Theta(\xi, Fo)}{\partial \xi^2} + Po Fo + Po_1; \\ (Fo \geq Fo_1; 0 \leq \xi \leq 1); \end{aligned} \quad (21)$$

$$\frac{\partial \Theta(0, Fo)}{\partial \xi} - Bi[\Theta(0, Fo) - 1] = 0; \quad (22)$$

$$\Theta(1, Fo) = q_2(Fo); \quad (23)$$

$$\frac{\partial \Theta(1, Fo)}{\partial \xi} = 0. \quad (24)$$

Начальным условием задачи (21) – (24) будет распределение температуры в конце первой стадии процесса, т. е. соотношение (10) при  $q_1(Fo) = q_1(Fo_1) = 1$ .

Решение задачи (21) – (24) принимается в виде

$$\Theta(\xi, Fo) = \sum_{k=0}^n b_k(q_2(Fo)) \xi^k, \quad (25)$$

где  $b_k(q_2(Fo))$  – коэффициенты, определяемые из граничных условий (22) – (24). После их определения соотношение (25) принимает вид

$$\Theta(\xi, Fo) = \frac{Bi + 2q_2 + Bi\xi^2 - 2Bi\xi + 2Bi\xi q_2 - Bi\xi^2 q_2}{Bi + 2}. \quad (26)$$

Осредняя уравнение (5) по всей ширине пластины, находим

$$\int_0^1 \frac{\partial \Theta(\xi, Fo)}{\partial Fo} d\xi = \int_0^1 \left( \frac{\partial^2 \Theta(\xi, Fo)}{\partial \xi^2} + PoFo + Po_1 \right) d\xi. \quad (27)$$

Подставляя (26) в (27), относительно  $q_2(Fo)$  получаем обыкновенное дифференциальное уравнение вида ( $Bi \rightarrow \infty, Po = 0$ )

$$2q_2' + 6q_2 - 3Po_1 - 6 = 0, \quad (28)$$

где  $q_2' = \frac{dq_2}{dFo}$ .

Его решение при начальном условии  $q_2(Fo_1) = \Theta(1, Fo_1)$  будет

$$q_2(Fo) = 1 + 0,5Po_1 - (-Po_1Fo_1 + 1 + 0,5Po_1)e^{-3(Fo-Fo_1)}, \quad (29)$$

где  $\Theta(1, Fo_1)$  – распределение температуры в пластине при  $Fo = Fo_1$ , определяемое из (11);  $Fo_1$  – время окончания первой стадии, определяемое из (14), положив  $q_1(Fo_1) = 1$ .

Соотношение (26) совместно с (29) представляют решение задачи (21) – (24) в первом приближении второй стадии процесса. Анализ результатов расчетов по формуле (26) позволяет заключить, что их отличие от точного решения [4] не превышает 9%. Для повышения точности следует увеличивать число членов ряда (25), для определения неизвестных коэффициентов которого необходимо использовать дополнительные граничные условия, первое из которых совпадает с соотношением (15), а второе и третье определяются с использованием дифференциального уравнения (21) и граничных условий (23), (24). Дифференцируя (23) по  $Fo$  и сопоставляя полученное соотношение с (21), находим второе дополнительное граничное условие

$$\frac{\partial^2 \Theta(1, Fo)}{\partial \xi^2} = \frac{dq_2(Fo)}{dFo} - PoFo - Po_1. \quad (30)$$

Дифференцируя (24) по переменной  $Fo$ , а уравнение (21) – по переменной  $\xi$ , после сопоставления полученных соотношений находим третье дополнительное граничное условие

$$\frac{\partial^3 \Theta(1, Fo)}{\partial \xi^3} = 0. \quad (31)$$

Физический смысл дополнительных граничных условий (15), (30), (31) в том, что их выполнение искомым решением эквивалентно выполнению уравнения (21) в граничных точках  $\xi = 0$  и  $\xi = 1$ . Расчеты показывают, что с увеличением числа дополнительных граничных условий, выполняемых в точках  $\xi = 0$  и  $\xi = 1$ , выполнение искомым решением (25) уравнения (21) существенно улучшается.

Подставляя (25), ограничиваясь шестью членами ряда, в основные (22) – (24) и дополнительные (15), (30), (31) граничные условия, относительно неизвестных коэффициентов  $b_k(q_2)$  ( $k = 0, 1, 2, \dots, 5$ ) будем иметь цепочную систему алгебраических линейных уравнений. Соотношение (25) после определения  $b_k(q_2)$  во втором приближении принимает вид

$$\begin{aligned} \Theta(\xi, Fo) = & 1 + \left( -\frac{5}{2} + \frac{3}{8} \frac{dq_2}{dFo} - \frac{1}{4} Po_1 + \frac{5}{2} q_2 \right) \xi - \\ & - \frac{1}{2} Po_1 \xi^2 + \left( 5 + \frac{5}{2} Po_1 - 5q_2 - \frac{7}{4} \frac{dq_2}{dFo} \right) \xi^3 + \\ & + \left( -5 - \frac{5}{2} Po_1 + 5q_2 + 2 \frac{dq_2}{dFo} \right) \xi^4 + \\ & + \left( \frac{3}{2} + \frac{3}{4} Po_1 - \frac{3}{2} q_2 - \frac{5}{8} \frac{dq_2}{dFo} \right) \xi^5. \quad (32) \end{aligned}$$

Подставляя (32) в интеграл теплового баланса (27), относительно  $q_2(Fo)$  получаем следующее обыкновенное дифференциальное уравнение

$$11q_2'' + 270q_2' + 600q_2 - 300Po_1 - 600 = 0, \quad (33)$$

где  $q_2'' = \frac{d^2 q_2}{dFo^2}$ .

Интегрируя уравнение (33), при начальном условии  $q_2(Fo_1) = \Theta(1, Fo_1)$  находим

$$q_2(Fo) = A_1 e^{-2,4711(Fo-Fo_1)} + A_2 e^{-22,075(Fo-Fo_1)} + 0,5Po_1 + 1, \quad (34)$$

где  $A_1 = -0,512Po_1 + 1,126Po_1Fo - 1,1267$ ;  $A_2 = 0,012Po_1 - 0,126Po_1Fo + 0,126$ .

Отметим, что в качестве начального условия функции  $q_2(Fo_1)$  использована формула (18) при  $Fo = Fo_1$ .

Результаты расчетов безразмерной температуры в первом и втором приближениях второй стадии процесса (при  $Bi \rightarrow \infty, Po = 0, Po_1 = 50$ ) представлены на рис. 4. Их анализ позволяет заключить, что использование дополнительных граничных условий дает возможность существенно увеличить точность получаемых решений. Отметим, что при  $Fo \geq 2$ , распределение температуры в пластине не зависит от времени, т. е. процесс теплообмена становится стационарным.

Преимущество полученных выше приближенных аналитических решений состоит в том, что при использовании экспериментальных данных об измене-

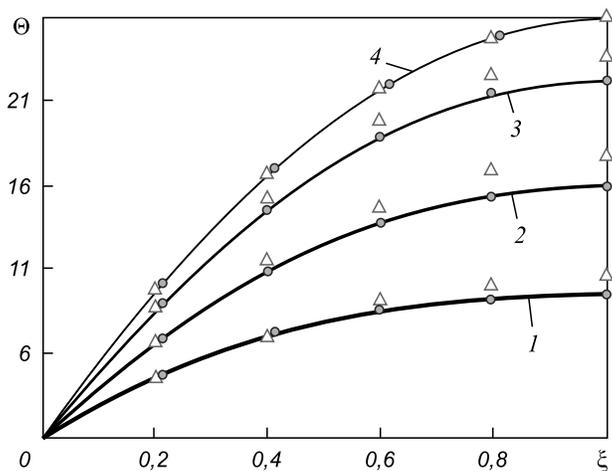


Рис. 4. Распределение безразмерной температуры в пластине с внутренними источниками теплоты (вторая стадия процесса) ( $Bi \rightarrow \infty, Po = 0, Po_1 = 50$ ) при  $Fo$ :  
 1 – 0,2; 2 – 0,4; 3 – 0,8; 4 – 2,0; 5,0; — — точное решение;  $\Delta$  – первое приближение;  $\circ$  – второе приближение

Fig. 4. Distribution of the dimensionless temperature in a plate with inner heat sources (second stage of the process) ( $Bi \rightarrow \infty, Po = 0, Po_1 = 50$ ) at  $Fo$ :  
 1 – 0,2; 2 – 0,4; 3 – 0,8; 4 – 2,0; 5,0; — — exact solution;  $\Delta$  – first approximation;  $\circ$  – second approximation

нии температуры в какой-либо точке пространственной координаты во времени может быть идентифицирован внутренний источник теплоты  $Po_1$ . В качестве примера рассмотрим задачу по определению мощности постоянного внутреннего источника теплоты ( $Po = 0$ ) при заранее известных условиях теплообмена поверхности пластины с окружающей средой, например, при  $Bi = 10$ .

Допустим, в ходе эксперимента измеряется температура на поверхности пластины в точке  $\xi = 0$  в некотором диапазоне  $0,02 \leq Fo \leq 0,05$ . В качестве экспериментальных данных будем использовать значения температуры при  $Po = 15$ , полученные на основе точного решения задачи (1) – (4) [4] (рис. 5):

$Fo$	0,02	0,03	0,04	0,05
$\Theta(Fo)$	0,82397	0,91943	0,99183	1,0513

Аппроксимируя экспериментальные данные полиномом третьей степени, найдем функцию  $\Theta(Fo)$ , описывающую распределение температуры в точке  $\xi = 0$ :

$$\Theta(Fo) = 11\,668Fo^3 - 267,2Fo^2 + 19,7Fo + 0,5233. \quad (35)$$

Решение задачи (1) – (4), полученное на основе определения фронта температурного возмущения (во втором приближении первой стадии процесса) при  $Bi = 10, \xi = 0$ , записывается в виде

$$\Theta(Fo) = \frac{2000Fo + 42FoPo_1 + 280\sqrt{5}Fo^{1,5}Po_1 - 27}{5600Fo + 392\sqrt{5}Fo + 42} + \frac{9}{14}. \quad (36)$$

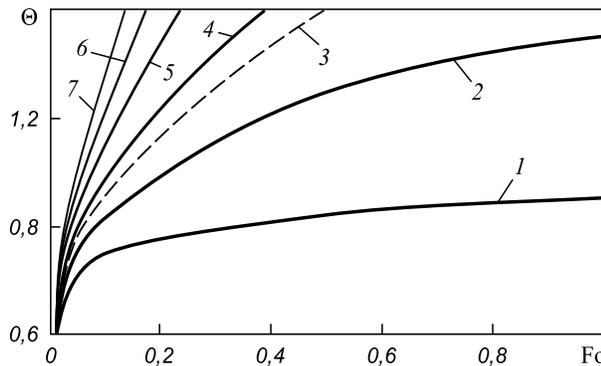


Рис. 5. Изменение безразмерной температуры в точке  $\xi = 0$  при  $Po$ :  
 1 – 0; 2 – 5; 3 – 8; 4 – 10; 5 – 15; 6 – 20; 7 – 25; — — приближенное аналитическое решение; - - - - экспериментальные данные ( $\Theta(Fo)$ )

Fig. 5. Distribution of the dimensionless temperature in point  $\xi = 0$  at  $Po$ :  
 1 – 0; 2 – 5; 3 – 8; 4 – 10; 5 – 15; 6 – 20; 7 – 25; — — approximate analytical solution; - - - - experimental data ( $\Theta(Fo)$ )

Приравнявая (35), (36) и определяя интеграл от полученного соотношения в пределах  $0,02 \leq Fo \leq 0,05$ , получаем

$$\int_{0,02}^{0,05} (11\,668Fo^3 - 267,2Fo^2 + 19,7Fo + 0,5233)dFo = \int_{0,02}^{0,05} \left( \frac{2000Fo + 42FoPo_1 + 280\sqrt{5}Fo^{1,5}Po_1 - 27}{5600Fo + 392\sqrt{5}Fo + 42} + \frac{9}{14} \right) dFo. \quad (37)$$

Вычисляя интегралы в (37), будем иметь алгебраическое уравнение

$$0,02853 = 0,00041198Po_1, \quad (38)$$

из решения которого  $Po_1 = 14,961$ . Точное значение числа Померанцева  $Po_1 = 15$ . Следовательно, отклонение найденного из уравнения (38) числа  $Po_1$  от его точного значения составляет менее 0,5 %.

**Выводы.** Применяя дополнительные граничные условия в интегральном методе теплового баланса, получено приближенное аналитическое решение нестационарной задачи теплопроводности для бесконечной пластины при симметричных граничных условиях третьего рода с переменным во времени источником теплоты. Разделение процесса теплопроводности на две стадии по времени позволило для каждой из них получить приближенное аналитическое решение простого вида с достаточной для инженерных приложений точностью.

Используя полученные решения, а также результаты точного аналитического решения этой же задачи, путем решения обратной задачи теплопроводности

идентифицирован переменный во времени источник теплоты. Результаты точного аналитического решения могут быть заменены экспериментальными данными. Полученные приближенные аналитические решения при известном из эксперимента изменении температуры в отдельной точке пластины во времени могут быть использованы для определения неизвестного источника теплоты, инициируемого какими-либо полями или, например, при полиморфном превращении металлов в процессе их кристаллизации. Могут быть идентифицированы также и любые другие заранее неизвестные параметры – начальные и граничные условия, физические свойства среды, размеры конструкции (толщина пластины).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kudinov V.A., Eremin A.V., Stefanyuk E.V. Analytical solutions of heat-conduction problems with time-varying heat-transfer coefficients // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2015. No. 3(88). P. 688 – 698.
2. Kudinov V.A., Eremin A.V., Stefanyuk E.V. Critical Conditions for Thermal Explosion in a Plate with a Nonlinear Heat Source // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2016. No. 1(45). P. 38 – 43.
3. Eremin A.V., Stefanyuk E.V., Abisheva L.S. Research on Heat Conductivity with a Time-Varying Heat Source // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. No. 698. P. 637 – 642.
4. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
5. Карташов Э.М. Аналитические методы в теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 1979. – 415 с.
6. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. – М.: Высшая школа, 2001. – 550 с.
7. Цой П.В. Методы расчета задач тепломассопереноса. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 414 с.
8. Цой П.В. Системные методы расчета краевых задач тепломассопереноса. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 568 с.
9. Болгарский А.В., Мухачев Г.А., Шукин В.К. Термодинамика и теплопередача. – М.: Высшая школа, 1975. – 495 с.
10. Лыков А.В. Тепломассоперенос: Справочник. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
11. Беляев Н.М., Рядно А.А. Методы нестационарной теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1978. – 328 с.
12. Гудмен Т. Применение интегральных методов в нелинейных задачах нестационарного теплообмена: Сб. науч. тр.: Проблемы теплообмена. – М.: Атомиздат, 1967. С. 41 – 96.
13. Глазунов Ю.Т. Вариационные методы. Москва – Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика; Институт компьютерных исследований, 2006. – 470 с.
14. Кудинов В.А., Кудинов И.В. Методы решения параболических и гиперболических уравнений теплопроводности. – М.: Книжный дом «Либроком», 2011. – 280 с.
15. Кудинов И.В., Кудинов В.А. Аналитические решения параболических и гиперболических уравнений тепломассопереноса. – М.: Инфра-М, 2013. – 391 с.

Поступила 5 февраля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 5, pp. 339–346.

## HEAT SOURCE IDENTIFICATION BASED ON ANALYTICAL SOLUTIONS OF THE HEAT-CONDUCTION PROBLEM

A.V. Eremin, E.V. Stefanyuk, L.S. Abisheva

#### REFERENCES

Samara State Technical University, Samara, Russia

**Abstract.** On the base of the temperature perturbations front and additional boundary conditions the authors have obtained the approximate analytical solution of the heat-conduction problem for infinite plate by boundary conditions of the third kind and time-variable heat source. Heat-conduction process was divided into two stages according to the time, that (dividing) helps to find simple analytical solutions for each stage separately. Obtained solutions are in the form of algebraic power series with time-dependent coefficients, those (coefficients) defined major and an extra boundary conditions, specified at the boundary points and at the temperature perturbations front, but in such a way that their implementation of the desired solution was equivalent to executing differential equations boundary-value problem in the whole range of spatial and temporal variables. Using described method it is possible to obtain analytical solutions in the entire time range of the non-stationary process, including small and the smallest values, almost with a given degree of accuracy. Obtained in this work, an analytical solution was used to identify time-varying source of warmth by solving the inverse heat-conduction problem.

**Keywords:** heat-conduction problem, infinite plate, approximate analytical solution, time-variable heat source, integral method, temperature perturbations front, additional (extra) boundary conditions, heat source identification.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-5-339-346

1. Kudinov V.A., Eremin A.V., Stefanyuk E.V. Analytical solutions of heat-conduction problems with time-varying heat-transfer coefficients. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2015, no. 3(88), pp. 688–698.
2. Kudinov V.A., Eremin A.V., Stefanyuk E.V. Critical Conditions for Thermal Explosion in a Plate with a Nonlinear Heat Source. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2016, no. 1(45), pp. 38–43.
3. Eremin A.V., Stefanyuk E.V., Abisheva L.S. Research on Heat Conductivity with a Time-Varying Heat Source. *Applied Mechanics and Materials*. 2015, no. 698, pp. 637–642.
4. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conduction]. Moscow: Vysshaya shkola, 1967, 600 p. (In Russ.).
5. Kartashov E.M. *Analiticheskie metody v teploprovodnosti tverdykh tel* [Analytical methods in thermal conduction of solids]. Moscow: Vysshaya shkola, 1979, 415 p. (In Russ.).
6. Kartashov E.M. *Analiticheskie metody v teorii teploprovodnosti tverdykh tel* [Analytical methods in thermal conduction of solids]. Moscow: Vysshaya shkola, 2001, 550 p. (In Russ.).
7. Tsoi P.V. *Metody rascheta zadach teplomassoperenosa* [Methods of calculating the heat and mass transfer problems]. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 414 p. (In Russ.).
8. Tsoi P.V. *Sistemnye metody rascheta kraevykh zadach teplomassoperenosa* [System methods for calculating the boundary value problems of heat and mass transfer]. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 2005, 568 p. (In Russ.).

9. Bolgarskii A.V., Mukhachev G.A., Shchukin V.K. *Termodinamika i teploperedacha* [Thermodynamics and heat transfer]. Moscow: Vysshaya shkola, 1975, 495 p. (In Russ.).
  10. Lykov A.V. *Tplomassoperenos: Spravochnik* [Heat and mass transfer: Handbook]. Moscow: Energiya, 1978, 480 p. (In Russ.).
  11. Belyaev N.M., Ryadno A.A. *Metody nestatsionarnoi teploprovodnosti* [Methods of non-stationary heat conduction]. Moscow: Vysshaya shkola, 1978, 328 p. (In Russ.).
  12. Goodman Theodore R. Application of Integral Methods to Transient Nonlinear Heat Transfer. In: *Advances in Heat Transfer, vol. 1*. New York – London: Academic Press, 1964. (Russ.ed.: Goodman T. In: *Problemyteploobmena*. Moscow: Atomizdat, 1967, pp. 41–96).
  13. Glazunov Yu.T. *Variatsionnye metody* [Variational methods]. Moscow – Izhevsk: NITs Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika; Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2006, 470 p. (In Russ.).
  14. Kudinov V.A., Kudinov I.V. *Metody resheniya parabolicheskikh i gi-perbolicheskikh uravnenii teploprovodnosti* [Methods for solving parabolic and hyper-hyperbolic heat conduction equations]. Moscow: Knizhnyi dom Librokom, 2011, 280 p. (In Russ.).
  15. Kudinov I.V., Kudinov V.A. *Analiticheskie resheniya parabolicheskikh i giperbolicheskikh uravnenii teplomassoperenosa* [Analytical solutions of parabolic and hyperbolic equations of heat and mass transfer]. Moscow: Infra-M, 2013, 391 p. (In Russ.).
- Acknowledgements.** This work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the framework of the basic part of the state task to “Samara State Technical University” (project code: 1273).
- Information about the authors:**
- A.V. Eremin**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Theoretical Foundations of Thermal Engineering and Fluid Mechanics” (a.v.eremin@list.ru)
- E.V. Stefanyuk**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Theoretical Foundations of Thermal Engineering and Fluid Mechanics” (totig@yandex.ru)
- L.S. Abisheva**, Assistant of the Chair “Theoretical Foundations of Thermal Engineering and Fluid Mechanics”

Received February 5, 2015

УДК 519.876

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ АРМ СИСТЕМЫ СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТРУБНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

*Фомин С.Я., д.т.н., профессор кафедры «Автоматизированные системы  
управления» (stan.fomin2010@yandex.ru)*

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

**Аннотация.** Традиционные подходы к решению задач автоматизации процессов оперативного (ситуационного) управления производством холоднодеформированных труб основаны на построении классических поведенческих моделей исследования операций с использованием количественной информации, что приводит к существенной потере семантического содержания информационной структуры слабоструктурированных задач адекватной процедуры выбора альтернативных решений. Предложен альтернативный подход, основанный на синтезе естественно-языковых семиотических моделей с использованием семантической информации при разработке инструментария для АРМ типа «Советчик мастера».

**Ключевые слова:** производство труб, АРМ – автоматизированное рабочее место, ситуационное управление, семиотическая модель, конфликтная ситуация, технологический маршрут, холоднодеформированные трубы, ЛТП – логико-трансформационные правила, элементарная ситуация, диалоговая процедура.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-5-347-353

Перспектива достижения реальных результатов в решении проблемы автоматизации процессов оперативного управления трубным производством видится в создании интеллектуальных инструментальных средств (ИС) автоматизированных рабочих мест (АРМ), систем типа «Советчик мастера», способных обеспечить оперативный персонал эффективными ИС разрешения разнообразных конфликтных ситуаций (КС) в режиме реального времени. Актуальность создания АРМ для оперативного персонала управления трубным производством определяется спецификой решаемых задач (большая размерность и существенный фактор информационной неопределенности).

В процессе разрешения КС оперативный персонал одновременно рассматривает и оценивает множество факторов: отклонения текущих характеристик работы элементов производственного комплекса (ПК) от плана; ситуационное состояние конкретных рабочих мест: укомплектованность бригад, уровни незавершенного производства и простой агрегатов, переоснастки агрегатов, наличие необходимого рабочего инструмента и трубной заготовки, восстановление вышедших из строя узлов оборудования, виды брака на конкретных операциях (О) технологических маршрутов (ТМ) и др.

Недостатком подходов к решению задач оперативного управления, ориентированных на использование традиционных моделей (уравнения, автоматы, транспортные сети, системы массового обслуживания,

А-системы), является ориентация на использование в их структурах количественной информации [1 – 3]. Язык традиционных формальных систем отображает только общие (синтаксические) свойства проблемных сред (ПС). Такое представление сложных ПС, целей и критериев приводит к потере их семантического содержания, влияющего на характер принимаемых оперативных решений. Поэтому наиболее адекватными средствами описания процессов принятия решений по управлению «большими» системами представляются естественно-языковые модели, используемые в структурах интеллектуальных систем управления [4, 5]. Системы, основанные на методологии искусственного интеллекта (ИИ), нашли широкое применение при выборе эффективных режимов функционирования разнообразных систем, в контуре управления которых существенная роль принадлежит человеку (ЛТП – лицо, принимающее решение) [4 – 10]. Психолингвистические исследования естественно-языковой составляющей механизмов принятия оперативных решений человеком подтверждают гипотезу о существовании универсального набора простейших операций, выполняемых над текстами естественного языка в процессе принятия конкретных решений [6]. Эти операции составляют основу естественно-языковых механизмов общения с внешним и внутренним миром, построения пространства целей, формирования моделей ПС, построения гипотез о причинах возникновения тех или иных возмущений (конфликтных ситуаций в ходе производственного про-

цесса) и соответствующей корректировки поведения (репланирование графиков работы станов и т.п.).

Для выполнения любой операции над текстами в общем случае необходимо обращение к базе знаний (БЗ) – внешней (ее роль играет ПС и мир, в котором она функционирует) или внутренней (ее роль играет накопленный опыт). Понятие БЗ является фундаментальным в содержании понятия ИИ. Каждая операция имеет постоянную часть, состоящую из схемы применения (синтаксис), и переменную часть, включающую в себя действия, не изменяющие истинность причинно-следственных связей (прагматику) и БЗ.

Рассмотрим основные элементы структуры системы ситуационного управления производством труб.

Для больших систем характерна динамика структуры и законов функционирования, обуславливающая динамику  $O$  через семантику и прагматику. Такие  $O$  называются семиотическими операциями (СО), а язык, который базируется на них, – семиотическим [6]. СО образует специальный класс знаков семиотики и отличается от формальных операций (ФО) тем, что при их выполнении между преобразуемыми абстрактными объектами устанавливаются те же причинно-следственные связи, которые имеют место между обозначаемыми элементами реального мира, в то время как ФО отображают только синтактику и не сохраняют причинно-следственные связи. Этим преимуществом СО объясняется эффективность использования их в структуре механизма принятия оперативных решений, основанной на построении семиотической модели (СМ) объекта управления (ОУ). Одной из существенных особенностей СМ системы принятия решений является присутствие в ней модели внешнего мира, записанной на некотором формализованном языке, сохраняющем семантику естественного языка. Трудность процедуры этого описания связана с многозначностью и «размытостью» понятий естественного языка. Однако, если заранее обозначить смысл употребляемых понятий в форме толкового словаря, то описание на естественном языке можно формализовать – записать в символической форме с помощью ограниченного числа знаков-понятий, связанных непосредственно с понятиями естественного языка. Такой СМ описывается широкий класс объектов управления – практически все объекты, которые могут быть описаны на естественном языке [6].

В качестве языка описания СМ чаще всего используется язык бинарных отношений (ЯБО), словарь которого достаточно прост и конструктивен. Словари указанного языка составляют:

- базовые понятия (например,  $x_i$ ,  $i = 1, 2, \dots$ ), которые содержатся в описании объекта:  $x_1$  – «стан»,  $x_2$  – печь, ...,  $x_{21}$  – пакет труб («деталь») и т. п.;
- базовые отношения (например,  $R_j$ ,  $j = 1, 2, \dots$ ), указывающие на отношения между базовыми понятиями. Для естественного языка выделено около 200 универсальных отношений, например

$R_1$  – «находится в»,  $R_2$  – «быть одновременно» и т. д. В этих отношениях постулируется их бинарность;

- имена – названия предметов, используемые на естественном языке (например,  $b_k = 1, 2, \dots$ ). Для введения имен используется специальное базовое отношение  $R_0$  – «иметь имя» (например, сочетание  $x_2 R_0 b_7$  означает «печь секционная»).

Каждый конкретный реальный объект ПК и система его управления порождают свой индивидуальный словарь базовых понятий, отношений и имен, которые вводятся в словарь по мере необходимости.

Синтаксис (грамматика данного языка) точно и недвусмысленно определяет формальные признаки синтаксически правильных фраз, что очень важно, так как вычислительная система (ВС) не обладает опытом человека, позволяющим сразу отсеивать неправильные конструкции фраз. При этом символическое описание сложных ситуаций с помощью ЯБО дает возможность выявления свойств объекта, которые неочевидно следуют из его описания (латентны). Используются разного рода формальные преобразования, с помощью которых можно изменять в нужную сторону исходное описание объекта. Эту формальную работу можно «доверить» ВС, используя алгебраические свойства базовых отношений  $R_j$ . Так, например, отношение  $R_2$  («быть одновременно») обладает свойством симметрии:  $(A_1 R_2 A_2) = (A_2 R_2 A_1)$ ; отношение  $R_1$  («находиться в») транзитивно, т. е. из  $(A_1 R_2 A_2)$  и  $(A_2 R_2 A_3)$  следует  $(A_1 R_2 A_3)$ . В настоящее время выявлено порядка 400 алгебраических свойств, с помощью которых можно преобразовывать исходное состояние (текущую ситуацию), т. е. достигать цели управления. Из имеющихся доступных способов непосредственного воздействия на ОУ выбирается одно и с помощью некоторых логико-трансформационных правил (ЛТП) текущая ситуация переводится в новую. Полный список ЛТП соответствует возможностям воздействия СУ на процессы, протекающие в ПК. В силу конечности числа различных воздействий все исходное множество полных ситуаций некоторым образом разбивается на существенно малое число классов, каждому из которых соответствует одно из реально допустимых управляющих воздействий на ОУ.

Структуризация ситуаций в системе оперативного управления трубным ПК реализована с помощью метода главных компонент факторного анализа и метода автоматической классификации [11]. Объединение ситуаций в классы при использовании одношаговых решений реализуется на субъективной основе. Предварительный отбор признаков классификации ситуаций осуществляется экспертами путем анализа работы ПК. Система, аккумулируя знания отдельных экспертов, становится носителем коллективного опыта.

В процессе эксплуатации уточняются процедуры классификации, понятия и ЛТП, первоначально сообщаемые экспертами в форме правил. Такая же обучаю-

щая последовательность реализуется и для правил экстраполяции и оценки тех или иных текущих ситуаций. Системы ситуационного управления (СиУ) ориентированы на достижение результатов, которые будут не хуже лучших результатов, получаемых «человеком». Практика их применения подтверждает это.

Отметим еще один существенный аспект реализации СиУ. Для многих реальных ОУ одношаговые решения не могут определять стратегию управления. В таких объектах формируются в качестве решений цепочки из одношаговых решений. Так, например, при изготовлении стальных холоднодеформированных (ХД) труб используются многопроходные многооперационные ТМ. На каждом проходе ТМ труба подвергается операции деформирования. Для «склейки» этих операций на смежных проходах ТМ оперативный персонал выясняет необходимость термообработки, связанной с исчерпанием ресурса пластичности металла трубы на данном проходе ТМ. Если ресурс еще не исчерпан, то операция термообработки перед следующим проходом ТМ не назначается. В противном случае перед следующим проходом трубы подвергаются отжигу и химической обработке по снятию окалины для нанесения антифрикционного покрытия перед последующей операцией деформирования труб [9].

Особенностью системы СиУ является возможность пополнения синтаксической модели в процессе функционирования (обучаемость), а также независимость (универсальность) основных блоков структуры модели (анализатор, классификатор и др.) [6]. Эта возможность обеспечена использованием языка СиУ. Основные алгоритмы работы с такими описаниями неизменны, меняются списки понятий и правила иерархического образо-

вания одних описаний из других. Одно понятие может быть частным случаем другого, что позволяет классифицировать ситуации. В качестве примера введем следующие базовые понятия и отношения:  $x_1^0$  – «стан»;  $x_2^0$  – «труба»;  $xR_0y$  – « $x$  имеет имя  $y$ »;  $xR_1y$  – « $x$  производит предмет  $y$ »;  $xR_2y$  – « $x$  произвел  $y$  тонн»;  $xR_3y$  – « $x$  происходит одновременно с  $y$ ».

Тогда ситуация «стан № 1 производит трубу 20×2 (диаметр 20 мм, стенка 2 мм) и произвел 3 т, стан № 3 производит трубу 40×3 (диаметр 40 мм, стенка 3 мм)» может быть записана в виде:

$$\left( (x_1^0 R_0 (\text{№ 1})) R_1 (x_2^0 R_0 (20 * 2)) R_2 (3) \right) \times R_3 \left( (x_1^0 R_0 (\text{№ 3})) R_1 (x_2^0 R_0 (40 * 3)) \right),$$

Введем небазовые понятия:  $x_1^1 = x_1^0 R_0 (\text{№ 1})$  – «стан №1»;  $x_2^1 = x_1^0 R_0 (\text{№ 3})$  – «стан № 3»;  $x_3^1 = x_2^0 R_0 (20 * 2)$  – «труба 20×2»;  $x_4^1 = x_2^0 R_0 (40 * 3)$  – «труба 40×3».

Базовая ситуация преобразуется в более компактный вид на другом уровне иерархии:  $(x_1^1 R_1 x_3^1 R_2 (3)) R_3 (x_2^1 R_1 x_4^1)$ .

Правила генерации управляющих воздействий, сформулированные для макро- или метаситуаций экспертами, также записываются на языке СиУ и вводятся в модель, аккумулируя опыт многих ЛПР разных уровней иерархии. На каждом уровне системы управления реализуется своя система формирования решений, для адекватного отображения которых введено понятие «элементарной операции», определенной во времени и пространстве элементарного действия (Act) над элементарным объектом ( $Ob_j$ ), представленной графом (рис. 1). Вершины графа отождествляют понятия, пред-

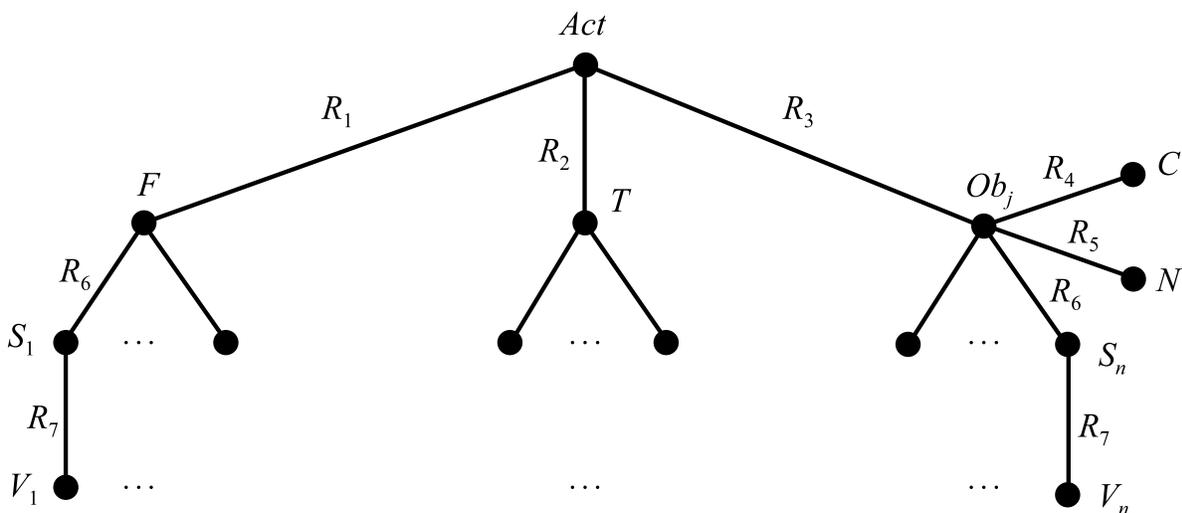


Рис. 1. Граф элементарной операции (элементарный список):  
Act – действие; P, T, Ob<sub>j</sub> – место, время и объект управления соответственно; N – тип объекта; S<sub>1</sub>, ..., S<sub>n</sub> – признаки (характеристики) места и времени объекта; V<sub>1</sub>, ..., V<sub>n</sub> – значения признаков

Fig. 1. Count of elementary operation (elementary list):  
Act – act; P, T, Ob<sub>j</sub> – place, time and object of control, respectively; N – type of object; S<sub>1</sub>, ..., S<sub>n</sub> – attributes (characteristics) of the place and time of the object; V<sub>1</sub>, ..., V<sub>n</sub> – values of characteristics

ставленные на рисунке. Могут выражаться числами, словами, предложениями.

Рассмотрим пример элементарной операции в системе оперативного управления цехом ХД труб:

*#Направить \*напольную тележку № 3 \* из \* отделения термообработки \* с \* трубами котельными \* 5 т \* в \* отделение химической обработки \* начать в \*10:20 \* закончить в \*10:35#*

Здесь: «направить» – действие  $Act$ , «напольную тележку» – тип объекта действия, «№ 3» – имя объекта, «трубами котельными» – тип объекта, «5 т» – признак объекта; «отделение термообработки», «отделение химической обработки» – соответственно, места действия – пункт отправления и пункт назначения; «из», «в» – признаки этих действий; «начать в», «закончить в» – признаки времени; «10:20», «10:35» – значения этих признаков.

Семантические связи (отношения) между понятиями отражаются ребрами  $R$  графа (см. рис. 1):  $R_1$  – «действие – место»;  $R_2$  – «действие – время»;  $R_3$  – «действие – объект»;  $R_4$  – «элемент класса – класс»;  $R_5$  – «иметь имя»;  $R_6$  – «иметь признак»;  $R_7$  – «признак – значение». Семи универсальных отношений достаточно для описания любой элементарной ситуации в системе оперативного управления ПК и реализации унифицированной структуры « $R_1 - R_7$ » в инструментальном комплексе АРМ «Советчик мастера». Вершинами графа « $R_1 - R_7$ », названного «Элементарным списком», могут быть самые различные элементы: числа, слова, предложения, имеющиеся в словаре базовых понятий. Программа достаточно легко определяет смысл каждого понятия, ориентируясь на семь универсальных отношений.

Поскольку число возможных ситуаций практически бесконечно, то заготовить заранее описание по одному конкретному списку на каждую ситуацию проблематично. Поэтому в системе формирования решений использован в качестве приемлемого средства описаний не конкретизированный или не полностью конкретизированный список. Вершинами графа могут быть как идентификаторы конкретных элементов-объектов, значения признаков и т. д., так и идентификаторы правил, с помощью которых конкретизируются эти элементы в зависимости от рассматриваемой ситуации. При этом каждое правило может учитывать не только ситуацию в целом, но и отдельные ее элементы, связанные семантически с определенным элементом операции.

Процедура формирования решений оперирует со списками операций, включающими: потенциальные, планируемые, актуальные и выполняемые. Список конкретизированных в АРМ «Советчик мастера» актуальных операций представляет собой решение, выданное исполнителю (бригады, операторы станков), переписывается в ВС в список выполняемых операций.

Программа Пл (планирование) находит для каждой выполняемой операции потенциальную операцию, следующую за ней в цепочке ТМ (например, травление

труб после отжига), производит возможную конкретизацию (например, возможность отжига труб в секционной, либо в проходной, либо в муфельной печи) и записывает результат в список планируемых операций. Логика программы А (актуализация технологических операций (ТО) записывается выражением

$$P(a, b) \wedge P(a, c), \quad (1)$$

где  $P$  – отношение «следовать непосредственно за»;  $a$  – запланированная ТО;  $b$  – выполненная ТО;  $c$  – выполненная транспортная операция или группа операций (например, транспортировка пакетов труб мостовым краном № 1 отделения химической обработки и напольной тележкой № 3).

Программа А сопоставляет списки выполненных операций со списком запланированных и переписывает в список актуальных те запланированные операции, для которых выражение (1) истинно. Используемые таким образом операции из соответствующих списков исключаются. Конкретизированные актуальные операции (программа К – конкретизация) выдаются оперативному персоналу в качестве решения, сформулированного на данном шаге управления, заносятся в список выполняемых операций и по мере их выполнения переводятся в список выполненных. Программа П (проверка) периодически проверяет список выполняемых операций. Если в списке оказываются операции, время выполнения которых истекло, то поступает соответствующий сигнал оперативному персоналу. Аналогичен принцип обработки транспортных операций.

Списки операций дают целостное (системное) представление процесса управления. Частная конкретизация элементов (решений) выносятся в массив правил. При составлении списков потенциальных операций определяется зависимость/независимость их от ситуации. Если элемент зависим от ситуации, то вместо него указывается идентификатор соответствующего правила. Так, например, при разрешении конфликтной ситуации «недокомплект вагонных норм» при формировании поставок трубной продукции по направлениям заказчиков необходимо указать идентификатор правила возможного разрешения указанного конфликта – прогноз вариантов репланирования загрузки трубных станов с помощью процедур имитационного моделирования.

При составлении (классификации) правил выясняется, от каких элементов ситуации и каким образом зависит конкретный элемент решения. Используется принцип семантической декомпозиции, который продуктивно согласуется с интуитивным представлением о процессе формирования оперативных решений при возникновении конфликтных ситуаций. Так, например, ЛПР должен разрешать в режиме реального времени ряд «конфликтов»: отставание от плана постав-

ки готовых труб конкретных марко-профилеразмеров, выяснить возможности восстановления вышедшего из строя узла агрегата (оправкодержателя стана, фрагмента кладки свода методической печи, редуктора приводного механизма протяжного стана и т. п.). Действительно, при возникновении подобных «конфликтов» ЛПП интуитивно стремится к оперативному разрешению каждого из локальных «конфликтов». Системное же их разрешение под силу преимущественно весьма опытным ЛПП. Создание адекватного инструментария АРМ позволяет ЛПП эффективно (системно) решать проблему выработки оперативных решений. Структурируются классы правил, с помощью которых решение доводится до таблицы с результатами, либо до алгоритма, либо до диспозиции. Рассмотрим суть этих структур.

Таблицы – это правила, которые непосредственно указывают соответствие между элементами решения и элементами ситуации. Например, соответствие наличия горячекатаной заготовки размерами 60×6 мм из стали ШХ-15 и калибров с оправками для холодной прокатки труб размером 30×2,5 мм из этой заготовки.

К алгоритмам относятся правила, содержащие точное предписание процесса обработки данных, ведущего от элементов ситуации к элементу решения.

Например, процедура генерации с помощью метода динамического программирования исходного множества альтернатив (ИМА) субоптимальных ТМ изготовления ХД труб [1].

В ряде случаев не удается довести решение задачи до таблицы или до алгоритма. При этом программное обеспечение АРМ должно предоставлять оперативному персоналу возможность «поэкспериментировать» в режиме диалога с ВС данными по конкретным ситуациям, предпринимать пробные шаги в поисках приемлемого решения. Правила, соответствующие таким задачам, называют диспозициями. Примером правила диспозиций является проверка перестановок графиков загрузки параллельно работающих протяжных станов с целью выравнивания очередей пакетов труб перед станами. Каждый вариант диспозиций проверяется на степень влияния их на реализацию смежных операций (до и после протяжки), а также на процесс комплектации вагонных норм. Процедура эвристического поиска реализуется на поведенческих моделях класса систем массового обслуживания.

Укрупненная алгоритмическая структура системы ситуационного управления трубным цехом представлена на рис. 2. Ниже изложено краткое содержание бло-



Рис. 2. Укрупненная алгоритмическая структура системы ситуационного управления трубным цехом

Fig. 2. Enlarged algorithmic structure of situational control system of pipe shop

ков диалоговой процедуры разрешения конфликтных ситуаций.

Исходная информация (блок 1) содержит сведения о выполнении заказов, незавершенном производстве, сырье (трубная заготовка и т. п.), обеспеченности необходимым рабочим инструментом, подачи железнодорожных вагонов и т. д. В блоке 2 поступающие тексты переводятся во внутреннее представление знаний на формализованном языке, сохраняющем семиотику естественного языка. При этом используются словари системы (блок 3) и необходимая нормативно-справочная информация (блок 4). На основе выявленных конфликтных ситуаций (блок 6), соответствующих сведений из базы знаний производственного процесса трубного цеха (блок 5) и правил из классов разрешения конфликтных ситуаций в системе принятия решений (блок 7), выполняется приемлемая корректировка графиков загрузки рабочих мест (блок 8). В блоке 9 полученные решения на языке внутреннего представления знаний преобразуются на ограниченный проблемно-ориентированный естественный язык для выдачи оперативному персоналу (блок 10).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лобов Ф.М. Оперативное управление производством. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2003. – 160 с.

2. Загидуллин Р.Р. Оперативно-календарное планирование в гибких производственных системах / Под ред. В.Ц. Зориктуева. – М.: Изд-во МАИ, 2004. – 208 с.
3. Маургауз Ю.Е. Автоматизация оперативного планирования в машиностроительном производстве. – М.: Экономика, 2007. – 286 с.
4. Евменов В.П. Интеллектуальные системы управления: Уч. пособие. – М.: Изд-во Libroком, 2009. – 290 с.
5. Бровкова М.В. Системы искусственного интеллекта в машиностроении: Уч. пособие. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2004. – 120 с.
6. Пospelov Д.А. Ситуационное управление. Теория и практика. – М.: Наука, 1986. – 284 с.
7. Мельников В.П., Васильева Т.Ю. Методология адаптивно-ситуационного управления технологической подготовки производства РЭА с применением экспертных моделей. – М.: Изд-во Буки Веди, 2014. – 262 с.
8. Колесников А.А. Ситуационное управление нестационарными производственными процессами. – Hamburg: LAP, 2012. – 220 с.
9. Фомин С.Я., Белякова Ю.С. Разработка диалоговой гибкой автоматизированной системы оперативного управления сложным многооперационным производством. Сообщение 2 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 5. С. 58 – 62.
10. Фомин С.Я., Силакова Ю.В. Диалоговая процедура оперативного планирования технологических операций сложного многооперационного производства. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 5. С. 51 – 55.
11. Фомин С.Я. Структуризация ситуаций в системе оперативного управления производственным комплексом // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 2. С. 52 – 53.

Поступила 23 мая 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 5, pp. 347–353.

### DEVELOPMENT OF THE ALGORITHMIC STRUCTURE ARM OF SITUATIONAL CONTROL SYSTEM OF PIPE PRODUCTION

S. Ya. Fomin

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

**Abstract.** Traditional approaches to solving the problems of operational process of automation (situational) production management of cold pipes are based on the construction of the classic behavioral research operations using quantitative information, which leads to a significant loss of semantic content of the information structure of semistructured problems of adequate procedures for the selection of alternative solutions. The article describes the alternative approach based on the synthesis of natural language semiotic models using semantic information in the development of tools for ARM type “Advisor Wizard”.

**Keywords:** production of pipes, ARM – workstation, contingency management, semiotic model, conflict situation, technological route, cold-deformed pipes, LTP – logic-transformation rules elementary situation, dialogic procedure.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-5-347-353

#### REFERENCES

1. Lobov F.M. *Operativnoe upravlenie proizvodstvom* [Production operations management]. Rostov-on-Don: Feniks, 2003, 160 p. (In Russ.).
2. Zagidullin R.R. *Operativno-kalendarное планирование в гибких производственных системах* [Operatively scheduling in flexible

manufacturing systems]. Zorikuev V.Ts. ed. Moscow: Izd-vo MAI, 2004, 208 p. (In Russ.).

3. Mauergauz Yu.E. *Avtomatizatsiya operativnogo planirovaniya v mashinostroitel'nom proizvodstve* [Automation of operational planning in the engineering industry]. Moscow: Ekonomika, 2007, 286 p. (In Russ.).
4. Evmenov V.P. *Intellektual'nye sistemy upravleniya. Uch. posobie* [Intelligent control systems. Manual]. Moscow: Izd-vo Librokom, 2009, 290 p. (In Russ.).
5. Brovkova M.V. *Sistemy iskusstvennogo intellekta v mashinostroenii Uch. posobie* [Artificial intelligence systems in mechanical engineering. Manual]. Saratov: SGTU, 2004, 120 p. (In Russ.).
6. Pospelov D.A. *Situatsionnoe upravlenie. Teoriya i praktika* [Contingency management. Theory and practice]. Moscow: Nauka, 1986, 284 p. (In Russ.).
7. Mel'nikov V.P., Vasil'eva T.Yu. *Metodologiya adaptivno-situatsionnogo upravleniya tekhnologicheskoi podgotovki proizvodstva REA s primeneniem ekspertnykh modelei* [The methodology of adaptive situational management of technological preparation of manufacturing electronics using expert models]. Izd-vo Buki Vedi, 2014, 262 p. (In Russ.).
8. Kolesnikov A.A. *Situatsionnoe upravlenie nestatsionarnymi proizvodstvennymi protsessami* [Contingency management of unsteady production processes]. Hamburg: LAP, 2012, 220 p. (In Russ.).
9. Fomin S.Ya., Belyakova Yu.S. Development of interactive flexible automated operating control system for management of a compound multioperational manufacturing. Report 2. *Izvestiya VUZov. Cherna-*

*naya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 5, pp. 58–62. (In Russ.).

10. Fomin S.Ya., Silakova Yu.V. Interactive operational planning procedure of the technical operations in the compound multioperational manufacturing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 5, pp. 51–55. (In Russ.).
11. Fomin S.Ya. Structuring situations in the operational management of production complex. *Izvestiya VUZov. Chernaya metal-*

*lurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2002, no. 9, pp. 52–53. (In Russ.).

***Information about the authors:***

***Fomin S.Ya.***, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Automation Control Systems (ACS) (stan.fomin2010@yandex.ru)

Received May 23, 2015

---

УДК 669.162.1:669.046

## ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ МАГНЕТИТОВЫХ РУД КОВДОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ В АГЛОПРОЦЕССЕ\*

*Писарев С.А., магистр кафедры «Энергоэффективные*

*ресурсосберегающие промышленные технологии» (labbor408@mail.ru)*

*Куренков Д.С., магистр кафедры «Энергоэффективные ресурсосберегающие*

*промышленные технологии»*

*Малышева Т.Я., к. г.-м. н., профессор кафедры «Энергоэффективные ресурсосберегающие*

*промышленные технологии»*

**Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»**

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

**Аннотация.** Особенностью руд Ковдорского месторождения является наличие в их составе магнетита гетерогенного строения, когда в железомagneзиевой матрице изоморфные примеси присутствуют в виде отдельных шпинельных фаз:  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{TiFe}_2\text{O}_4$ . Исследован процесс фазовых превращений кристаллов магнетита гетерогенного строения в условиях, приближенных к агломерационному. В интервале 1100 – 1300 °С в восстановительной среде происходит распад кристаллов магнетита на две оксидные фазы: магнетит и вюстит с перераспределением между ними изоморфных примесей. Одновременно в сростках кристаллов оксидных фаз с вмещающими породами образуются силикаты с высокой температурой плавления. Следовательно композиция оксидных и силикатных фаз является причиной ранее установленной заторможенности процесса расплавообразования при агломерации железных руд с участием магнетитового концентрата Ковдорского месторождения.

**Ключевые слова:** железные руды, магнетит гетерогенного строения, агломерационный процесс.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-5-354-356

Методом электронной микроскопии установлено, что в железорудных месторождениях различного генезиса кристаллы магнетита обладают принципиально разными типами оруденения. Магнетит большинства железорудных месторождений имеет гомогенное строение и по составу близок к стехиометрии: 31 %  $\text{FeO}$ ; 69 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . В рудах Ковдорского месторождения магнетит имеет гетерогенное строение. В его железомagneзиевой матрице элементы изоморфных примесей существуют в виде отдельных шпинельных фаз: герцинита  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ , магнезиальной шпинели  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  и ульвошпинели  $\text{TiFe}_2\text{O}_4$  [1 – 3].

Для изучения структурных особенностей магнетита гетерогенного строения в условиях, приближенных к агломерационному процессу, отбраны хорошо ограниченные кристаллы магнетита из руд Ковдорского месторождения. Термообработку кристаллов магнетита проводили в лабораторной печи сопротивления в восстановительной атмосфере ( $\text{CO}_2:\text{CO} = 80:20$  и  $50:50$ ). Температура обжига составляла 900, 1100, 1300 °С, время обжига – 15 и 30 мин. Образцы охлаждались вместе с печью до комнатной температуры в среде восстановительных газов.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение № 14.278.21.0065 от 20.10.2014 г. Уникальный идентификатор соглашения RFMEF 157814X0065.

Микроструктура восстановленных кристаллов магнетита изучена оптическим методом, химический состав минеральных фаз определен методом рентгено-спектрального микрозондирования.

В кристаллах магнетита, восстановленных при температуре 900 °С, отсутствуют фазовые и микроструктурные изменения. В восстановленных пробах при 1100 и 1300 °С четко прослеживаются структуры распада. Природный магнетит превращается в двухфазную рудную композицию, состоящую из магнетита и вюстита с перераспределением между фазами изоморфных примесей. Установлено, что в магнетите остаются практически все компоненты изоморфных примесей гетерогенных кристаллов ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ). В составе новообразований вюстита обнаружен оксид магния, количество которого заметно превышает его содержание в составе природного магнетита (см. таблицу).

Данные о термических свойствах продуктов распада гетерогенных кристаллов магнетита пока отсутствуют. Однако очевидно, что они мало чем должны отличаться от температур плавления фаз стехиометрического состава, например магнетита и вюстита (1591 и 1350 °С соответственно).

При изучении минерального состава железорудных агломератов главное внимание отводится механизму

**Химический состав кристаллов природного магнетита и продуктов его распада по данным рентгеноспектрального микрозондирования, % (по массе)**

**Chemical composition of crystals of natural magnetite and its decay products according to X-ray spectral microprobe**

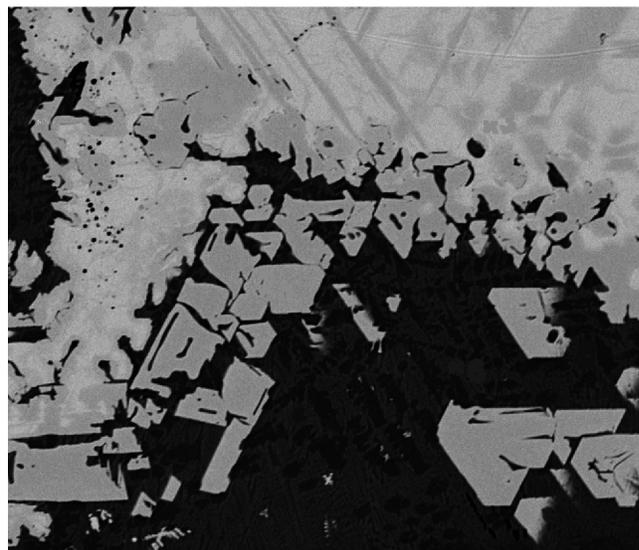
Минерал	Fe <sub>общ</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO
Исходный	61,7	7,7	1,4	0,7	0,9
Магнетит	61,1	4,2	2,4	1,3	0,8
Вюстит	62,1	9,2	0,3	0,2	0,8

формирования силикатно-ферритных связок – носителей прочности готовой продукции. Капли первичного силикатного расплава, появившегося на участках контакта кристаллов магнетита с вмещающими породами, состоят из стеклофазы оливинового с дендритами кальцийфосфатного силиката – силикокарнитита  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_2\text{SiO}_2$ , температура плавления которого превышает 1700 °С.

Следовательно, наличие в аглошихте руд Ковдорского месторождения магнетита гетерогенного строения и появление в процессе спекания агломерата продуктов их распада в виде высокотемпературных оксидных и силикатных минералов подтверждает высказанное ранее предположение о сложности ведения процесса агломерации при использовании магнетитовых руд гетерогенного строения [4].

**Выводы.** Гетерогенные кристаллы магнетита Ковдорского месторождения являются сложной микросистемой, состоящей из железомagneйовой матрицы с включениями шпинельных фаз в виде  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{TiFe}_2\text{O}_4$ . В условиях агломерационного процесса природные кристаллы гетерогенного магнетита распадаются на две высокотемпературные фазы: магнетит и вюстит с перераспределением между ними изоморфных примесей. Появление наряду с продуктами распада магнетита высокотемпературных силикатов усугубляет микроструктурную неоднородность композиции рудных и силикатных фаз, затормаживающих процесс расплавообразования при участии в железорудной шихте магнетитовых руд Ковдорского месторождения.

Работа с железными рудами, имеющими в своем составе кристаллы магнетита гетерогенного строения, только начата. Полученных в настоящем исследовании



Капля силикатного расплава на границе с продуктами распада кристалла гетерогенного магнетита:  
вюстит – белый; магнетит – серый;  
силикокарнитит – черные дендриты; стеклофаза – темно-серая.  
Отраженный свет, ×900

Silicate melt drop at the boundary with the decay products of heterogeneous crystal of magnetite:  
wustite – white, magnetite – grey,  
silicoorganic – black dendrites, glass phase – dark grey.  
Reflected light, ×900

данных недостаточно для совершенствования существующего процесса спекания аглошихт с их участием. Необходимо продолжение поиска возможности использования этих руд в технологических процессах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гайдук И.С., Чернышева Л.И. Новые данные о структурах распада в магнетитах Ковдорского месторождения // Докл. АН СССР. 1970. Т. 195. № 3. С. 682 – 685.
2. Григорьев И.М. Элементы – примеси в железных рудах и их генетическое значение // Минеральное сырье. 1971. Вып. 15. С. 3 – 12.
3. Кудрявцева Г.П. Ферримagnetизм природных оксидов. – М.: Недра, 1988. – 232 с.
4. Малышева Т.Я., Павлов Р.М., Мансуров Н.Р., Деткова Т.И. Влияние природного рудообразования на минеральный состав и холодную прочность офлюсованных железорудных агломератов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 3. С. 180 – 185.

Поступила 11 апреля 2016 г.

## BEHAVIOR OF MAGNETITE ORES OF KOVDOR DEPOSIT IN SINTERING PROCESS

*S.A. Pisarev, D.S. Kurenkov, T.Ya. Malysheva*

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

**Abstract.** The peculiarity of Kovdor deposit ores is the presence of magnetite of heterogeneous structure when the isomorphous impurities present in celonite matrix as separate spinel phases:  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{TiFe}_2\text{O}_4$ . The authors have investigated the process of phase transfor-

mations of magnetite crystals of heterogeneous structure in conditions close to sinter. In the range of 1100 – 1300 °C in reducing environment occurs the dissolution of magnetite crystals in two oxide phases: magnetite and wustite with redistribution of isomorphous impurities between them. At the same time the silicates with high melting points are formed in the joints of crystals of oxide phases with the host rocks. Therefore, the composition of oxide and silicate phases is the cause of the previously established retardation of the process of melt formation during iron ore sintering with the participation of magnetite concentrate of Kovdor deposit.

**Keywords:** iron ore, magnetite heterogeneous structure, sintering process.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-5-354-356

#### REFERENCES

1. Gaidukova I.S., Chernysheva, L.I. New data on the decay structures in Kovdor magnetites. *DAN SSSR*. 1970, vol. 195, no. 3, pp. 682–685. (In Russ.).
2. Grigor'ev I.M. Trace elements in iron ores and their genetic significance. *Mineral'noe syr'ye*. 1971, vol. 15, pp. 3–2. (In Russ.).
3. Kudryavtseva G.P. *Ferrimagnetizm prirodnykh oksidov* [Ferrimagnetism of natural oxides]. Moscow: Nedra, 1988, 232 p. (In Russ.).

4. Malysheva T.Ya., Pavlov R.M., Mansurov N.R., Detkova I.V. Effect of natural ore formation on mineral composition and cold strength of iron ore fluxed agglomerates. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 3, pp. 180–185. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, the agreement number 14.278.21.0065 from 20.10.2014, the unique identifier of the agreement RFMEF 157814X0065.

#### Information about the authors:

**S.A. Pisarev**, MA Student of the Chair “Energy-efficient and Resource-saving Industrial Technologies” (labbor408@mail.ru)

**D.S. Kurenkov**, MA Student of the Chair “Energy-efficient and Resource-saving Industrial Technologies”

**T.Ya. Malysheva**, Cand. Sci. (Geol.-Mineralogical), Professor of the Chair “Energy-efficient and Resource-saving Industrial Technologies”

Received April 11, 2016

УДК 669.788

## ЭФФЕКТ ГОРСКОГО (к 80-летию выдающегося открытия В.С. Горского)

*Вольфсон Е.Ф., исполнительный директор (efm.volfcon@mail.ru)*

Некоммерческая организация фонд «Новик»  
(249013, Россия, Боровск, пос. Институт, 4, оф. 49)

**Аннотация.** На основании проведенных исследований эффект Горского может иметь принципиальное значение при разработке технологий изготовления изделий из металлов прецизионной конфигурации (эталонные инструменты, станки и т.д.). Явление, открытое В.С. Горским, продолжает раскрываться новыми гранями и, несомненно, ждет своего исследователя. С большой уверенностью можно сказать, что результаты, которые будут получены, превзойдут самые невероятные ожидания и прогнозы.

**Ключевые слова:** эффект Горского, водород, водород в металлах.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-5-357-359

Одним из основных направлений работы фонда «Новик» являются исторические патентные исследования и исследования по истории естествознания. Одно из таких исследований посвящено открытию в области диффузионных свойств водорода применительно к металлам. В 1935 г. в Харьковском институте теоретической и экспериментальной физики при исследовании изотермических деформаций на образцах из золотых мембран и проволок было обнаружено явление частичной релаксации заданных упругих деформаций в пластические, после чего удалось наблюдать деформации обратной направленности. В.С. Горскому удалось установить взаимосвязь релаксационных деформаций и диффузии атомов внедрения водорода. Первоначально эффект Горского использовался как методика изучения диффузионного поведения атома водорода в сплавах меди и золота. Довоенные исследования позволили разработать прецизионные методики измерения коэффициента диффузии водорода в металлах. Примечателен тот факт, что в разработке теоретических основ понимания процессов, составляющих сущность явлений, открытых Горским, особую роль сыграл совсем еще молодой и малоизвестный в то время физик-теоретик Л.Д. Ландау, впоследствии лауреат Нобелевской премии, чьим именем назван Институт теоретической физики (ИТФ) РАН. В ИТФ Л.Д. Ландау разработывал теорию среднего поля и анализировал фазовые переходы второго рода [1]. В 60-е и 70-е годы XX в. эффект Горского был в центре внимания научных исследований во многих странах, таких как США, Германия, Великобритания, Польша и др. Эффект Горского был подтвержден практически во всех металлах и большинстве сплавов. Исследования проводились в рамках разработки топливных элементов

для двигателей внутреннего сгорания, работающих на водороде.

Сущность явления, открытого Горским, проявляется в следующем. Дефекты, вызывающие искажения кристаллической решетки, традиционно описывают как упругие диполи. Переориентация анизотропных упругих диполей во внешнем поле деформаций приводит к появлению неупругих релаксаций. Имеет место частичная трансформация заданных упругих деформаций в пластические. Если дефекты обладают высокой подвижностью, как, например, водород в металлах, то возникает диффузионная релаксация в условиях градиента деформаций. Это явление вошло в историю науки как эффект Горского [2].

Для водорода в ОЦК металлах, по-видимому, выполняются все условия для наблюдения этих релаксационных процессов. Растворение водорода вызывает расширение решетки. В ОЦК структуре не существует междоузлий, обладающих полной кубической симметрией. Было экспериментально доказано, что водород в металлах Nb и Ta занимает тетраэдрические междоузлия. По этой причине следует ожидать, что упругий диполь будет анизотропным, а водород будет иметь высокую подвижность. Характерная величина коэффициента диффузии при комнатной температуре составляет  $D \approx 5 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ .

Предложенное рассмотрение легко обобщается на случай поликристаллического образца, коим может быть, например, образец из инструментальной стали, находящийся на любом этапе термической обработки. Зеренная структура металла, имеющего кубическую решетку, позволяет его рассматривать как однородный объект с точки зрения моделей изгиба, разработанных в рамках теории упругости, но при этом кристаллиты представляют собой объекты, охваченные полем де-

формаций, которые испытывают неоднородную дилатацию. Неоднородная дилатация отдельного кристаллита зависит от ориентации кристаллита в пространстве, если изделие подвергнуто общему изгибу какой-либо внешней силой. Процессы релаксации заданной упругой деформации и ее частичную трансформацию в пластическую деформацию в неизотермических условиях корректно рассматривать в соответствии с эффектом Горского [2]. Также вправе ожидать и проявления эффекта запоминания формы под влиянием температурно-временного фактора вследствие самодиффузии водорода. Надо также учитывать влияние концентрации растворенного водорода на изменения удельного объема [3, 4].

Однако такое рассмотрение требует прямого подтверждения наличия растворенного водорода в том или ином объекте, который подвергается технологии термической обработки.

Наличие водорода в металлах во многих случаях рассматривается как результат повсеместного распространения атомарного водорода в природе, но при этом надо отметить наличие прямых исследований, подтверждающих присутствие водорода в металлах. Методики подобного рода исследований базируются на вакуумной экстракции в условиях нагрева.

Для описания деформаций применительно к эффекту Горского традиционно используют следующую символику. Упругую деформацию, возникающую под воздействием внешних факторов, обозначают  $\varepsilon^e$ , неупругую деформацию, возникающую вследствие диффузии водорода –  $\varepsilon^a$ , а полноту трансформации упругой деформации в пластическую (релаксационная сила) –  $\Delta_E = \varepsilon^a / \varepsilon^e$ . Многочисленные эксперименты по исследованию эффекта Горского, направленные, главным образом, на прецизионные измерения коэффициента диффузии водорода, показали в различных системах обратную зависимость релаксационной силы от температуры:  $\Delta_E \sim T^{-1}$ .

Важно отметить, что исследования эффекта Горского традиционно предполагают, что исходное состояние насыщенной водородом пластинки или проволоки, подвергаемой упругому изгибу, идеально соответствует прямолинейной конфигурации. Однако для проведения деформационных исследований на прецизионных изделиях и образцах применительно к требованиям, сложившимся в технологии производства инструмента, такое предположение некорректно и необходимо учитывать начальное коробление образца, а само деформационное состояние образца не всегда предполагает завершенность деформаций и нестабильно во

времени. Поэтому необходимо ввести в рассмотрение исходное коробление  $\bar{w}$ , а упругое деформирование проводить так, чтобы  $\bar{\varepsilon}^e$  и  $\bar{w}$  были антиколлениарны. Вообще говоря, исходное деформационное состояние может сопровождаться короблением сложного характера, в связи с чем для проведения деформационных исследований целесообразно выбирать образцы с короблением с максимумом отклонения, близким к середине, при этом имеющем однонаправленный характер. Это обстоятельство существенно отличает реальную практику устранения коробления в термической обработке инструмента от методики исследования заданных деформаций.

Уместно также сделать замечание относительно нейтральной поверхности. Поверхность, на которой деформации обращаются в ноль внутри металлической пластинки, может существовать, так как миграция водорода предполагает возможным некоторое сжатие при уменьшении концентрации водорода по сравнению с первоначальной. На нейтральной поверхности концентрация водорода совпадает с первоначальной, в то время как с растянутой (выпуклой) стороны она увеличивается при приближении к поверхности, а с вогнутой стороны она уменьшается. Положение нейтральной поверхности может изменяться и смещаться в ту сторону образца, где происходит уменьшение концентрации водорода, т. е. в направлении вогнутой части изделия. Теоретическое описание изгиба пластин и цилиндрических стержней исследовано в классических трудах по теории упругости [5, 6].

**Выводы.** Эффект Горского может иметь принципиальное значение при разработке технологий изготовления изделий из металлов прецизионной конфигурации (эталоны, инструменты, станки и т.д.).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ландау Л. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1937. Т. 7. С. 627.
2. Водород в металлах / Под ред. Г. Алефельда и И. Фелькля. Т. 1. – М.: Мир, 1981. – 475 с.
3. Goldberg H.A. Elastic interaction, spinodals, and density modes in thin metal-hydrogen systems // J. Phys. C, Solid State Phys. 1977. Vol. 10. No. 12(2059).
4. Горский В.С. // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1936. Т. 6. С. 272.
5. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. – М.: Мир, 1965. – 204 с.

Поступила 30 марта 2016 г.

## TO THE 80TH ANNIVERSARY OF THE FAMOUS OPENING OF V.S. GORSKII

**E.F. Vol'fson**

Non-profit organization "Novick Fund", Borovsk, Russia

**Abstract.** According to the author of this article, Gorskii effect may be crucial in the development of technologies for the manufacture of precision metal configuration (standards, tools, machines). The phenomenon of V.S. Gorskii continues to reveal new facets and, of course, waits for its researcher and the author is confident that the results to be obtained will surpass the most incredible expectations and projections.

**Keywords:** Gorskii effect, hydrogen, hydrogen in metals.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-5-357-359

## REFERENCES

1. Landau L. *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki*. 1937, vol. 7, p. 627. (In Russ.).
2. *Hydrogen in Metals. Vol. 1. Basic properties*. Alefeld G., Völkl J. eds. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1978. (Russ. ed.: *Vodorod v metallakh. vol. 1*. Moscow: Mir, 1981, 475 p.
3. Goldberg H.A. Elastic interaction, spinodals, and density modes in thin metal-hydrogen systems. *J. Phys. C, Solid State Phys.* 1977, vol. 10, no. 12(2059).
4. Gorskii V.S. *Zhurnal eksperimental'noi i teoreticheskoi fiziki*. 1936, vol. 6. p. 272. (In Russ.).
5. Timoshenko S.P., Goodyear J.N. *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill, New-York, 1970. (Russ.ed.: Timoshenko S.P., Goodyear J. *Teoriya uprugosti*. Moskva: Nauka, 1975, 576 p.).
6. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow: 1965, 204 p. (In Russ.).

**Information about the authors:**

**E.F. Vol'fson**, Executive Director (efm.volfson@mail.ru)

Received March 30, 2016

Над номером работали:

Леонтьев Л.И., *главный редактор*

Полулях Л.А., *ответственный секретарь*

Ивани Е.А., *заместитель главного редактора*

Потапова Е.Ю., *заместитель главного редактора по развитию*

Долицкая О.А., *научный редактор*

Расенец В.В., *верстка, иллюстрации*

Кузнецов А.А., *системный администратор*

Острогорская Г.Ю., *менеджер по работе с клиентами*

---

Подписано в печать 17.05.2016. Формат 60×90 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бум. офсетная № 1.  
Печать цифровая. Усл. печ. л. 9,0. Заказ 5104. Цена свободная.

---

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