

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

# ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

---

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

---

№ 5, 2015

Издается с января 1958 г. ежемесячно

Том 58

---

# ИЗВЕСТИЯ

## ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

### ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

**Главный редактор:** ЮСФИН Ю.С.

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

**Заместитель главного редактора:** ПРОТОПОПОВ Е.В.

(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

**Ответственный секретарь:** ПОЛУЛЯХ Л.А.

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

**Заместитель ответственного секретаря:** ОЛЕНДАРЕНКО Н.П.

(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

#### Члены редакционной коллегии:

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

АШИХМИН Г.В. (ОАО «Институт Цветметобработка», г. Москва)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

#### Учредители:



Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»



Сибирский государственный индустриальный университет

Настоящий номер журнала подготовлен к печати  
Сибирским государственным индустриальным университетом

#### Адреса редакции:

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

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

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

# IZVESTIYA

VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA

IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY

**Chief editor:** YUSFIN YU.S.

(National Research Technological University "MISIS", Moscow)

**Deputy chief editor:** PROTOPOPOV E.V.

(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

**Responsible secretary:** POLULYAKH L.A.

(National Research Technological University "MISIS", Moscow)

**Deputy responsible secretary:** OLENDARENKO N.P.

(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

## Editorial board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

SPEIDEL M. (Swiss Academy of Materials, Switzerland)

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

## Founders:



National Research  
Technological University "MISIS"



Siberian State  
Industrial University

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

## Editorial addresses:

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

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

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

**Протопопов Е.В.** Сибирскому государственному индустриальному университету 85 лет ..... 293

### МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

**Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Фейлер С.В.** Вклад кафедры металлургии черных металлов в развитие теории и техники высокотемпературного моделирования продувки конвертерной ванны ..... 299

**Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Прошунин И.Е., Ходосов И.Е.** Обогащение полиметаллических марганецсодержащих руд и рациональное использование полученных концентратов ..... 309

**Якушевич Н.Ф., Полях О.А., Галевский Г.В., Тяжина А.А.** Анализ фазово-химических равновесий в системе расплав (Fe – Si – C) – шлак (CaO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub>) – газ (O<sub>2</sub> – SiO – CO) ..... 316

**Фастыковский Р.А., Уманский А.А.** Теория и практика ресурсосберегающих технологий производства сортового проката на действующих непрерывных станах ..... 322

**Перетягко В.Н., Сметанин С.В., Филиппова М.В.** Новая технология прокатки трамвайных желобчатых рельсов ..... 328

**Галевский Г.В., Руднева В.В., Гарбузова А.К.** Металломатричные защитные покрытия с наноконпонентами: формирование, свойства, применение ..... 335

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

**Осколкова Т.Н.** Способ повышения износостойкости карбидовольфрамовых твердых сплавов ..... 341

**Громов В.Е., Воробьев С.В., Сизов В.В., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф.** Структурно-масштабные уровни увеличения усталостной долговечности сталей и сплавов электронно-пучковой обработкой ..... 346

### РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

**Кузнецов С.Н., Волюнкина Е.П., Протопопов Е.В.** Высокотемпературные металлургические агрегаты – эффективные утилизаторы опасных органических отходов ..... 352

**Зоря В.Н., Коровушкин В.В., Пермяков А.А., Волюнкина Е.П.** Исследование минерального состава и кристаллической структуры железосодержащих компонентов техногенных отходов металлургического комплекса ..... 359

### ИНЖИНИРИНГ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

**Кулаков С.М., Мусатова А.И., Кадыков В.Н., Баранов П.П.** Применение тактовых моделей в задачах реинжиниринга производственных систем в металлургии ..... 367

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

**Мышляев Л.П., Ивушкин А.А., Ивушкин К.А., Грачев В.В., Ляховец М.В.** Состояние и пути развития систем управления со структурным разнообразием ..... 376

**Мышляев Л.П., Циряпкина А.В., Ивушкин К.А., Киселев С.Ф.** Управление объектами с рециклом ..... 381

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

**Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Демина Е.И.** Определение усилия резания на ножницах предварительно изогнутой полосы ..... 386

---

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 5

---

## CONTENTS

**Protopopov E.V.** To the 85-th Anniversary of Siberian State Industrial University ..... 293

### METALLURGICAL TECHNOLOGIES

**Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Feiler S.V.** Contribution of the chair of ferrous metallurgy to the development of the theory and technique of high-temperature modeling of converter bath blowing ..... 299

**Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Proshunin I.E., Khodosov I.E.** Polymetallic manganese ore dressing and optimal use of the obtained concentrates ..... 309

**Yakushevich N.F., Polyakh O.A., Galevskii G.V., Tyazhina A.A.** Analysis of phase and chemical equilibrium in the system of melt (Fe – Si – C) – slag (CaO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub>) – gas (O<sub>2</sub> – SiO – CO) ..... 316

**Fastykovskii A.R., Umanskii A.A.** Theory and practice of resource-saving technologies of mill bar production at the operating continuous rolling mills ..... 322

**Peretyat'ko V.N., Smetanin S.V., Filippova M.V.** New technology of tram grooved rail rolling ..... 328

**Galevskii G.V., Rudneva V.V., Garbuzova A.K.** Metalmatrix protective coatings with nanocomponents: formation, properties, application ..... 335

### MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES

**Oskolkova T.N.** The ways of increasing wear resistance ability of WC–Co hard alloy ..... 341

**Gromov V.E., Vorob'ev S.V., Sizov V.V., Konovalev S.V., Ivanov Yu.F.** Structural-scale levels of fatigue durability increase of steels and alloys by electron-beam treatment ..... 346

### THE RATIONAL USE OF NATURAL RESOURCES IN FERROUS METALLURGY

**Kuznetsov S.N., Volynkina E.P., Protopopov E.V.** High-temperature metallurgical aggregates – effective utilizers of hazardous organic wastes ..... 352

**Zorya V.N., Korovushkin V.V., Permyakov A.A., Volynkina E.P.** The research of the mineral composition and crystal structure of iron-containing components of technogenic waste of the metallurgical complex ..... 359

### ENGINEERING IN FERROUS METALLURGY

**Kulakov S.M., Musatova A.I., Kadykov V.N., Baranov P.P.** Application of the timing model in reengineering of the production systems in metallurgy ..... 367

### INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

**Myshlyayev L.P., Ivushkin A.A., Ivushkin K.A., Grachev V.V., Lyakhovets M.V.** Situation and development trends of Control Systems with structural diversity ..... 376

**Myshlyayev L.P., Tsiryapkina A.V., Ivushkin K.A., Kiselev S.F.** Management of objects with recycle ..... 381

### BRIEF COMMUNICATIONS

**Nikitin A.G., Epifantsev J.A., Demina E.I.** The determination of cutting force on the scissors at pre-curved strip cutting ..... 386



## СИБИРСКОМУ ГОСУДАРСТВЕННОМУ ИНДУСТРИАЛЬНОМУ УНИВЕРСИТЕТУ 85 ЛЕТ



**Протопопов Е.В.,**  
*д.т.н., профессор, ректор*

Сибирский институт черных металлов (СИЧМ) создан в 1930 г. по решению Совета народных комиссаров и Центрального Исполнительного Комитета СССР на базе специальности «Металлургия черных металлов» Томского технологического института. Осенью 1931 г. по инициативе академика И.П. Бардина институт был переведен в г. Новокузнецк. «Металлургия черных металлов», «Литейное производство черных и цветных металлов», «Обработка металлов давлением», «Термическая обработка металлов» – самые первые специальности, к реализации которых приступил СИЧМ. 49 «первенцев» – металлургов, выпускников 1931 г., специалистов в области производства чугуна и стали, открыли славную историю института – «кузницы инженерных кадров» для строящегося в те годы центра металлургической промышленности на востоке страны Кузнецкого металлургического комбината (КМК).

До 1938 г. институт оставался единственным в Сибири высшим учебным заведением, которое обеспечивало высококвалифицированными кадрами металлургические предприятия Сибири и Дальнего Востока. За первое десятилетие своего существования институтом было подготовлено порядка 700 инженеров-металлургов.

Великая Отечественная война стала особым испытанием не только для нашей страны, но и для родного вуза. Несмотря на все тяготы военного времени, учебный процесс в институте не прекращался. Более того, в начале войны из Москвы в Новокузнецк на площадку института был эвакуирован наш головной вуз – Московский институт стали.

В военные годы перед учеными Сибирского металлургического института (СМИ) была поставлена новая задача оборонного значения – освоение на КМК производства броневой стали. Для ее решения, причем в кратчайшие сроки, были привлечены ведущие специалисты: доменщики и сталеплавильщики, прокатчики и термисты, теплотехники и литейщики. Выплавка, разливка, прокатка и термическая обработка броневой стали, резка толстых слябов танковой брони, разработка технологий производства и отливки 76-мм снарядов, изготовления других видов боеприпасов – вот далеко неполный перечень «революционных» для того времени технологий, которые СМИчи успешно реализовали в производстве. Большой вклад в осуществление этих разработок внесли профессора и доценты Ю.В. Грдина, И.С. Назаров, Е.Я. Зарвин, Э.Х. Шамовский, Н.И. Куницын, А.А. Говоров и многие другие. Хорошо известен тот факт, что в годы Великой Отечественной войны на КМК выпускалось до 30 % всей броневой стали страны и до 50 % броневых листов. Поэтому разработки наших ученых сложно переоценить.

В послевоенные годы в период активного восстановления народного хозяйства, в условиях возросшей потребности в инженерных кадрах, бурного развития угольной и горнорудной отраслей промышленности

в СМИ открыты новые специальности горного профиля, а в 1948 г. организован горный факультет. В 1960 г. созданы механический и строительный факультеты. В 1965 г. построено новое здание главного корпуса института площадью 26000 кв. м. В период с 1973 по 1986 гг. введены в эксплуатацию новые корпуса института – металлургический и горно-технологический – общей площадью 15 000 кв. м, спортивный комплекс с плавательным бассейном, блок поточных аудиторий и два девятиэтажных общежития.

В 1980 г. за заслуги в подготовке квалифицированных специалистов для народного хозяйства и развитии научных исследований Сибирский металлургический институт им. Серго Орджоникидзе награжден правительством СССР орденом Трудового Красного Знамени.

90-е годы – время перемен. СМИ вступил в новый период развития. Высокий потенциал вуза позволил ему перейти в новый статус – в 1994 г. СМИ стал Сибирской государственной горно-металлургической академией (СибГГМА), а через 4 года – вторым в истории отечественной высшей школы получил статус индустриального университета и был переименован в Сибирский государственный индустриальный университет – СибГИУ.

Такие серьезные трансформации института в университет стали возможны благодаря реализации целого комплекса мероприятий и административных решений, адекватных новым веяниям времени. В первую очередь значительно изменился перечень специальностей и направлений подготовки, реализуемых в вузе. Если до 1990 г. СМИ реализовывал всего 20 специальностей, то в 1998 г. их количество достигло 40. Вуз из металлургического трансформировался в политехнический (индустриальный), ориентированный в первую очередь на развивающийся многоотраслевой промышленный регион – Кузбасс.

Начало XXI века – период серьезных испытаний и проверки правильности взятого курса, первых результатов функционирования в изменившихся социально-экономических условиях, который СибГИУ успешно выдержал, подтвердив новый статус университета во время комплексных оценок деятельности процедур государственной аккредитации и ежегодного мониторинга эффективности деятельности.

В настоящее время СибГИУ осуществляет подготовку специалистов, бакалавров, магистров, аспирантов, докторантов, реализует программы дополнительного профессионального образования.

Сегодня университет реализует программы высшего образования:

– по ступеням образования – в соответствии с государственными образовательными стандартами второго поколения (ГОС) по 77 основным образовательным программам высшего профессионального образования: подготовки специалистов – 51, бакалавров – 19, магист-

ров – 7 (прием на образовательные программы по ГОС ВПО завершен в декабре 2010 года);

– по уровням – в соответствии с федеральными государственными образовательными стандартами (ФГОС) по 63 основным образовательным программам высшего профессионального образования, в том числе бакалавриата – 30, специалитета – 4, магистратуры – 16, аспирантуры – 13.

Реализация образовательных программ осуществляется по 20 укрупненным группам специальностей и направлений подготовки (УГСН): 01.00.00 Математика и механика, 03.00.00 Физика и астрономия, 04.00.00 Химия, 05.00.00 Науки о земле, 07.00.00 Архитектура, 08.00.00 Техника и технологии строительства, 09.00.00 Информатика и вычислительная техника, 11.00.00 Электроника, радиотехника и системы связи, 13.00.00 Электро- и теплоэнергетика, 15.00.00 Машиностроение, 18.00.00 Химические технологии, 20.00.00 Техносферная безопасность и природообустройство, 21.00.00 Прикладная геология, горное дело, нефтегазовое дело и геодезия, 22.00.00 Технологии материалов, 23.00.00 Техника и технологии наземного транспорта, 27.00.00 Управление в технических системах, 38.00.00 Экономика и управление, 39.00.00 Социология и социальная работа, 42.00.00 Средства массовой информации и информационно-библиотечное дело, 46.00.00 История и археология.

Университет представляет собой современный учебно-научный комплекс, включает 11 институтов (в том числе 7 выпускающих): Институт металлургии и материаловедения; Институт машиностроения и транспорта; Институт горного дела и геосистем; Архитектурно-строительный институт; Институт информационных технологий и автоматизированных систем; Институт экономики и менеджмента; Институт фундаментального образования; Институт планирования карьеры; Институт дополнительного профессионального образования; Институт открытого образования; Институт физической культуры, здоровья и спорта. В структуре университета восемь научно-учебных лабораторий, Центр коллективного пользования «Материаловедение», Студенческий бизнес-инкубатор, Научно-исследовательский центр «Геомеханика», Лаборатория «Энергогенерирующие технологии и комплексы», три консультативных и девять научно-образовательных центров.

Одним из приоритетов развития СибГИУ является создание и реализация научно-исследовательской продукции и поддержка инновационного предпринимательства. На основе инновационных разработок ученых СибГИУ создано десять малых предприятий. С 2008 г. СибГИУ является стратегическим партнером Кузбасского технопарка – одного из самых крупных региональных технопарков в России.

В университете функционируют три диссертационных совета по девяти научным специальностям.

Реализацию фундаментальных и прикладных исследований осуществляют в 17-ти научных школах.

Численность профессорско-преподавательского состава в 2014 г. составила более 500 человек, в том числе 66 докторов и 253 кандидатов наук. Из числа научно-педагогических кадров университета 16 человек – заслуженные деятели науки Российской Федерации, 10 человек награждены Премией правительства Российской Федерации в области науки и техники, 47 человек являются действительными членами и членами-корреспондентами общественных Академий наук.

За время своего существования вуз подготовил более 75 000 специалистов, в том числе почти 30 000 – выпускники металлургических специальностей. При этом СибГИУ является единственным за Уралом вузом, который осуществляет подготовку кадров и ведет научные исследования по металлургическому направлению.

В числе научных достижений последнего пятилетнего периода: получение коллективами ученых университета двух Премий Правительства РФ в области науки и техники; выполнение комплексного проекта Согласно Постановлению Правительства РФ от 09.04.2010 г. № 218 по созданию высокотехнологичного производства с ООО «Объединенная Компания «Сибшахтострой» общей стоимостью 300 млн. руб; присуждение коллективу ученых СибГИУ и ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» на основании решения Президиума Российской Академии наук премии им. И.П. Бардина. Впервые в истории СибГИУ учеными университета сделаны три научных открытия, подтвержденных Международной академией авторов научных открытий и изобретений. По показателям публикационной активности РИНЦ из почти 600 государственных вузов России СибГИУ сегодня вышел на 87 место.

Наш университет имеет богатый опыт участия в конкурсах различного уровня в области качества. Победа в конкурсе «Системы качества подготовки выпускников» Минобрнауки России в период с 2005 по 2011 гг. позволила университету разработать, внедрить и сертифицировать систему менеджмента качества, широко заявить о приверженности качеству образования, постоянному улучшению деятельности вуза. Поддерживаемое направление постоянного совершенствования деятельности предопределяет необходимость выхода на новый уровень управления качеством образования посредством проведения независимой оценки качества образования на соответствие критериям Европейской премии в области качества и возможностью представлять свои достижения на суд авторитетной организации – Европейского фонда менеджмента качества.

В 2014 г. СибГИУ стал дипломантом конкурса Европейской премии в области качества (EFQM) в номинации «Признанное Совершенство».

В настоящее время СибГИУ является единственным вузом за Уралом, получившим всемирно признаваемое свидетельство выдающихся достижений деятельности в области качества.

Сегодня партнерами университета являются крупнейшие промышленные предприятия Кузбасса и России, целый ряд ведущих университетов мира и ближнего зарубежья, известные производственные корпорации Uppsala University (Швеция), Tsinghua University (КНР), Adelphi University (США), University of Belgrade (Республика Сербия), ThyssenKrupp Resource Technologies (Германия), SANDVIK Mining (Австрия) и т.д.

Свой 85-летний юбилей научно-педагогический коллектив университета встречает полный планов, новых идей и перспектив на дальнейшее развитие.

*В канун юбилея в адрес университета поступила масса поздравлений и теплых слов от наших выпускников, известных ученых и деятелей науки и образования. Позволим себе опубликовать некоторые из них.*



**Ю.С. Карабасов**

*Президент Национального исследовательского технологического университета «Московский институт стали и сплавов», д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки Российской Федерации*

Сибирский государственный индустриальный университет для меня больше известен как Сибирский металлургический институт, а короче СМИ. И как-бы этот вуз не менял своего названия и статуса в историю высшего образования России он войдет в первую очередь как сибирский и металлургический. Славный вуз, с крепкими традициями, его металлургические научные школы и качество подготовки специалистов известны всей России. Поздравляю ректорат и научно-педагогический коллектив университета с 85-летним юбилеем, желаю СМИчам успехов, процветания, новых достижений.



**Г.Н. Еланский**

*Профессор кафедры технологии и оборудования металлургических процессов Московского государственного машиностроительного университета, д.т.н., Заслуженный деятель науки Российской Федерации*

Юбилей вуза – это хороший момент для оценки прошлого, осмысления настоящего, подведения итогов и разработки планов на будущее. С сибиряками-новокузнецчанами меня связывают десятки лет тесных научных контактов и простой человеческой дружбы. За 85 лет вуз из чисто металлургического трансформировался в полиспециальный, но что характерно, остался верен своим традициям. Мощные научные школы, специализирующиеся на вопросах производства стали, ферросплавов, обработки металлов давлением, материало- и металловедения, знамениты своими достижениями не только в России, но и зарубежом. Уважаемые коллеги! Примите самые искренние поздравления со славным юбилеем, дальнейшего Вам развития, творческого долголетия и всех благ.



**А.А. Смирнов**

*Научный руководитель Уральского института металлов, первый заместитель генерального директора, академик Российской Академии наук, д.т.н., профессор*

Металлургия Урала и Сибири давно и тесно связана. Наша совместная работа началась с момента пуска Кузнецкого металлургического комбината и создания Сибирского металлургического института. Уральский институт металлов и Сибирский государственный индустриальный университет – ровесники, в текущем году нам тоже исполняется 85 лет. От работы с сибиряками у меня только положительные впечатления: все всегда четко, а главное – надежно. СМИ нам подарил целую плеяду великих ученых, металлургов, прокатчиков, металловедов. Не могу не вспомнить профессоров Б.Н. Жеребина, Е.Я. Зарвина, Ю.В. Грдину, Н.А. Челышева. От всего сердца поздравляю коллектив университета с юбилеем, желаю не останавливаться на достигнутом, идти вперед, развивая свой потенциал на благо российской науки и образования.



**В.М. Финкель**

*Заведующий кафедрой физики СМИ 1963 – 1969 гг. Филадельфия, США*

тому несколько. Вот они: СМИ создавался в тридцатые годы, в основном, из высококультурной, подвижнической томской интеллигенции. Это были высокообразованные научные работники, которые строили институт в прочном сотрудничестве с КМК. Поэтому и изначально, и в последующие годы институт никогда не висел в воздухе – он всегда был нужен промышленности. Поэтому и научная работа в нем кипела всегда. И, судя по всему, так будет и в будущем!

Вторая причина заключалась в том, что институт создавался интеллигентными людьми. И в нем был создан фундамент, который гарантировал высокий уровень человеческих отношений и преподавательской работы. Некоторых из этих людей мне повезло застать, когда я перешел из ЦЗЛ КМК на кафедру физики СМИ. Это профессора Г.В. Грдина, А.Д. Крамаров, М.А. Зайков, М.Я. Меджибожский, П.М. Масловский, И.С. Назаров. Это были люди не только с высокопрофессиональ-

### **С юбилеем, СМИ**

Для иного ВУЗа полвека – это глубокая старость. Для СМИ и 85 – это молодость! Почему бы это? Причин

ными знаниями, но и с большим достоинством. Это были личности! В сотрудничестве с ректоратом (Э.Х. Шамовским, Е.Я. Зарвиным, Н.В. Толстогузовым) они определяли общий климат в институте. Вот он этот климат: научная работа уважалась, добротная преподавательская деятельность ценилась, хороший лектор – был уважаемой фигурой, о которой знал весь институт и город! Кстати, самым ярким и запомнившимся тогда лектором института был заведующий кафедрой математики В.И. Соболев. Его лекции были не только глубокими по содержанию, но и увлекательными по форме. Когда он скончался, его провожали сотни любивших его студентов и преподавателей.

Была и своего рода этика приема экзаменов. Принимали по-разному. Ю.В. Грдина – спокойно, академично, укладывался в 3 часа. Был доцент Ю.В. Кротов (кафедра сопромата), образованнейший человек, великолепно знавший и художественную литературу, он приходил на экзамен с термосом и бутербродами и экзаменовал до позднего вечера. Все были разными, но все – абсолютно честными!

СМИ-СибГИУ молод и будет молодеть потому, что у него хорошие гены! Прекрасная наследственность, трудолюбие и талантливость новых поколений обеспечат ему процветание и в последующие 85 лет!



**А.М. Глезер**

*Директор Института физики металлов  
и металловедения им. Г.В. Курдюмова  
ЦНИИЧЕРМЕТ им. И.П. Бардина, д.т.н., профессор*

С металлофизиками СибГИУ меня связывают крепкие научные связи и многолетняя дружба: совместные статьи, обзоры, монографии по фундаментальным и прикладным проблемам наноструктурного материаловедения, проведение международных конференций, подготовка аспирантов и докторантов...

Сердечно поздравляю коллектив университета с юбилеем! Новых творческих успехов, уверенности в завтрашнем дне!!!



**В.А. Мальцев**

*Директор института, профессор, д.т.н.*

дальнего зарубежья ученые, внесшие значительный вклад в развитие науки и экономики страны.

Мы отмечаем также, что давнишние деловые и дружеские связи, сложившиеся между металлургами Урала и металлургами Сибири, всегда были прочными, остаются таковыми и сегодня. Благодаря этим связям и взаимопомощи нам удастся успешно решать многие научные и производственные проблемы, а также, что не менее важно, готовить научные кадры высокой квалификации.

Желаем Вам и в дальнейшем плодотворно трудиться, творчески решать новые научные проблемы, увлекать оригинальными идеями производителей, успешно внедрять новые разработки и передавать огромный опыт своим талантливым молодым ученикам!

Металлурги Уральского федерального университета искренне поздравляют коллег Сибирского государственного индустриального университета с юбилеем.

Мы с удовольствием отмечаем, что Вашему университету есть, чем гордиться. В стенах университета плодотворно работали и трудятся сегодня многие выдающиеся, известные в России, в странах ближнего и

*Коллектив Института материаловедения  
и металлургии:  
Профессора С.С. Набойченко, Ю.Г. Ярошенко,  
А.А. Попов, В.Г. Лисиенко, А.А. Богатов,  
С.П. Бурмасов, Н.А. Спирин, С.А. Загайнов и др.*



**Д.А. Новиков**

*Заместитель директора  
ИПУ РАН  
д.т.н, член-корреспондент РАН,  
профессор*



**В.Н. Бурков**

*Руководитель  
лаборатории № 57  
д.т.н., профессор*

УВАЖАЕМЫЕ КОЛЛЕГИ – ученые и преподаватели Сибирского государственного индустриального университета!

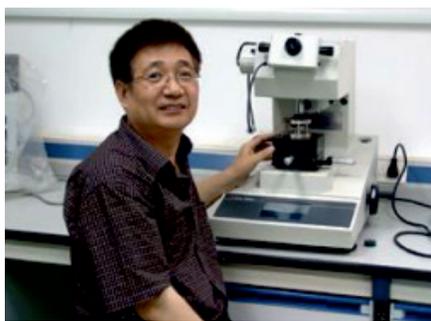
Коллектив Института проблем управления РАН (г. Москва) сердечно поздравляет Вас с юбилеем – 85-летием университета!

Университет родился в период 1-ой пятилетки, когда в Кузбассе развернулось крупномасштабное строительство Кузнецкого металлургического комбината. В течение короткого времени вуз стал кузницей инженерных кадров для быстро развивающейся промышленности региона и СССР. Сотрудничество ученых ИПУ РАН и СибГИУ началось в 60-е годы 20-го века в период

строительства в г. Новокузнецке Западно-Сибирского металлургического комбината. И продолжается в настоящее время.

За прошедшие годы выполнено много совместных научных разработок в области автоматизированных систем управления. Параллельно, при содействии ИПУ РАН, шла подготовка молодых кандидатов и докторов наук. Ряд совместных разработок был отмечен Государственными премиями СССР и Российской Федерации.

В дни юбилея СибГИУ желаем Вам творческих успехов и продолжения нашего сотрудничества на многие годы!



**G. Tang**

*Director, Institute of Advanced Materials  
of Tsinghua University*

We have active cooperation and collaboration nearly 10 years with the scientific school lead by Prof. V.E. Grovov on the problems of electromagnetic fields and electric current action on the processes of steel and alloys plastic deformation. 5 International conferences in Moscow, Tomsk, Shenzhen are conducted, International grants of Russian FBI and Chinese FNS are carried out exchange of post graduated students and research fellows are took place. A happy 85-th jubilee! May this date brings you everlasting happiness and success in whatever you do, prosperity to you and your families.

УДК 669.184.001.57

## ВКЛАД КАФЕДРЫ МЕТАЛЛУРГИИ ЧЕРНЫХ МЕТАЛЛОВ В РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ТЕХНИКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОДУВКИ КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЫ

*Протопопов Е.В.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов, ректор  
Чернятевич А.Г.<sup>2</sup>, д.т.н., профессор, заведующий отделом физико-технических проблем  
металлургии стали*

*Фейлер С.В.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов (feyler@rdtc.ru)*

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

<sup>2</sup> Институт черной металлургии Национальной академии наук Украины  
(49050, Украина, г. Днепрпетровск, площадь академика Стародубова, 1)

**Аннотация.** Освещены результаты разработки и совершенствования установок и методик высокотемпературного моделирования гидрогазодинамических и тепломассообменных закономерностей верхней и комбинированной продувки конвертерной ванны. Показана роль кафедры металлургии черных металлов ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет» в развитии теоретических аспектов продувки металлического расплава в конвертере газовыми струями. Благодаря использованию конвертеров со смотровыми окнами, применению специальных приемов визуализации реакционной зоны и фотокиносъемки удалось пронаблюдать и зафиксировать макрокартину физических явлений на поверхности продуваемой конвертерной ванны. Разработанная методика использования прозрачной стенки конвертера позволила получить достоверную информацию о состоянии и перемещении границы раздела шлак – металл при различных способах продувки и механизме образования выбросов. Разработанные и обоснованные основные положения методики высокотемпературного моделирования различных вариантов продувки конвертерной ванны с предложением чисел динамического подобия позволяют с большой достоверностью переносить полученные данные с модели на промышленный образец. Предложены практические варианты подхода к изучению гидрогазодинамических и тепломассообменных процессов, протекающих в основных реакционных зонах рабочего пространства конвертера при верхней и комбинированной продувке.

**Ключевые слова:** высокотемпературное моделирование, верхняя и комбинированная продувка, конвертерная ванна, реакционная зона, гидрогазодинамика, тепломассообмен.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-299-308

Развитие производства стали массового сортамента от бессемеровского и томасовского переделов до классического кислородно-конвертерного процесса первоначально основывалось не на строго научной базе, а являлось результатом творчества талантливых изобретателей и исследователей, предложивших методом проб и ошибок способы продувки чугуна воздухом и технически чистым кислородом, конвертерные агрегаты и фурменные устройства для их реализации. С самого начала для проверки возникших технических идей, а в случае положительного результата для дальнейшей отработки технологии продувки конвертерной ванны, совершенствования конструкции конвертеров и фурменных устройств исследователи проводили реальный высокотемпературный эксперимент на лабораторных и полупромышленных агрегатах малой садки.

Проведенные в свое время на лабораторных установках эксперименты [1, 2] по исследованию механизма явлений при верхней кислородной продувке конвертерной ванны убедительно показали неоспоримое преимущество высокотемпературного моделирования по сравнению с холодным с точки зрения получения

истинной информации о развитии гидрогазодинамических и тепломассообменных процессов в рабочем пространстве конвертера. Трудно представить, как с использованием холодного моделирования конвертерных процессов можно было бы установить, например, факт преимущественного протекания реакции обезуглероживания в пределах ограниченного объема конвертерной ванны, в зоне воздействия кислородной струи. Это впервые было доказано немецкими исследователями [2] на лабораторном двухкамерном конвертере и подтверждено в работах [3 – 7] с использованием той же методики постановки опытов. Без преувеличения можно отметить, что результаты работы [2] послужили толчком к последующему проведению целого комплекса высокотемпературных экспериментов [5, 6, 8 – 15] по выяснению механизмов физико-химических явлений в рабочем пространстве конвертера при верхней кислородной продувке. Эти эксперименты проводили на кафедрах «Металлургия стали и теории металлургических процессов» Днепрпетровского металлургического института (ДМетИ) под руководством профессора В.И. Баптизманского, доцента К.С. Просвирина

и профессора В.Б. Охотского [5, 8, 9, 14] и на кафедре «Металлургия стали» Сибирского металлургического института (СМИ) (после переименования кафедра «Металлургия черных металлов» СибГИУ) под руководством профессора Е.Я. Зарвина [6, 10 – 13, 15].

В соответствии с положениями работ [1, 2] немецкими исследователями в начале 60-х годов прошлого столетия кислородный конвертер с верхней продувкой был представлен как комплексный реактор, который состоит из ряда отдельных реакционных зон, не являющихся независимыми одна от другой, а именно:

- зоны взаимодействия кислородного дутья с отходящими газами полости конвертера;
- зоны непосредственного воздействия струй дутья на шлаковую и металлическую фазы конвертера;
- зоны вспененной шлакометаллической эмульсии;
- объема металлической ванны.

В этой связи в процессе исследований усилия сотрудников кафедры «Металлургия стали» СМИ были направлены на разработку и совершенствование методик и установок для высокотемпературных исследований гидрогазодинамических и тепломассообменных процессов в указанных реакционных зонах, оценки влияния последних на общий ход рафинирования конвертерной ванны при различных способах продувки.

В работах [16 – 18] высокотемпературное моделирование представляется как метод экспериментального исследования, в котором изучение какого-либо гидрогазодинамического, физико-химического и тепломассообменного явления или их совокупности производится на уменьшенной горячей модели промышленного образца.

Доказывается [16], что с учетом геометрического и физического подобия модели образцу особенно важно подобие динамическое подобие режимов [16 – 18]:

- струйного течения кислородных и кислородно-топливных потоков, формируемых различного типа верхними и боковыми фурменными устройствами, и их взаимодействия с содержащими мелкодисперсную пыль отходящими газами, брызгами металла и шлака на пути распространения к ванне;
- воздействия верхних и боковых кислородных и других газовых струй непосредственно на металлическую и шлаковую фазы конвертерной ванны;
- внедрения донных топливно-кислородных и нейтральных (азот, аргон) струй в металлическую ванну и их взаимодействия;
- поведения конвертерной ванны в ходе продувки, а именно, общего изменения уровня ванны, вспенивания металлической и шлаковой фаз в отдельности, возникновения всплесков, волн, брызг и направленных циркуляционных потоков; образования газошлакометаллической эмульсии, выносов мелких капель металла и шлака, выбросов значительных объемов шлакометаллической взвеси за пределы рабочего пространства конвертера.

При условии постоянства чисел Ньютона горячей модели и образца и представления, что гидрогазодинамические явления, происходящие в конвертерной ванне, в преобладающей степени определяются взаимодействием инерционных сил газовых струй и сил тяжести металлического расплава, получено с учетом геометрического подобия число  $C_d$  динамического подобия [16 – 18] процесса продувки конвертерной ванны

$$C_d = \frac{\rho_g w_g^2 F_g}{k_k \rho_m F_{\text{ц}} h_b g} = \frac{I_g}{m_m g} = \text{idem}, \quad (1)$$

где  $\rho_g$  и  $\rho_m$  – плотность газа и металла, кг/м<sup>3</sup>;  $w_g$  – скорость газа, м/с;  $h_b$  – глубина металлической ванны в спокойном состоянии, м;  $m_m$  – садка конвертера, кг;  $F_g$  – площадь критического сечения дутьевых сопел, м<sup>2</sup>;  $F_{\text{ц}}$  – площадь сечения конвертерной ванны в цилиндрической части, м<sup>2</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $k_k$  – коэффициент, учитывающий форму днища конвертера;  $I_g$  – суммарный импульс газовых струй, определяющий силу воздействия струй на ванну, кг·м/с<sup>2</sup>.

С учетом критериального числа  $C_d$  и конструктивных особенностей фурмы применительно к верхней многоструйной кислородной продувке основные условия динамического подобия имеют вид

$$\frac{i_{\text{O}_2}^B \cos \alpha n_b}{m_m g} = \text{idem}; \quad \frac{H_{\phi}}{d_{\text{вых}}} = \text{idem}; \quad \frac{d_0^B}{D_{\text{ц}}} = \text{idem}, \quad (2)$$

где  $i_{\text{O}_2}^B$  – импульс отдельной кислородной струи;  $n_b$  и  $\alpha$  – количество сопел в наконечнике фурмы и угол наклона их к вертикали;  $H_{\phi}$  – высота фурмы над уровнем ванны;  $d_{\text{вых}}$  – диаметр выходного сечения сопла фурмы;  $d_0^B$  – диаметр окружности расположения сопел на торце наконечника;  $D_{\text{ц}}$  – диаметр ванны в цилиндрической части конвертера.

При комбинированной продувке конвертерной ванны кислородом сверху и нейтральным перемешивающим газом через днище условия динамического подобия выглядят следующим образом:

$$\frac{i_{\text{O}_2}^B \cos \alpha n_b}{m_m g} = \text{idem}; \quad \frac{H_{\phi}}{d_{\text{вых}}} = \text{idem}; \quad \frac{d_0^B}{D_{\text{ц}}} = \text{idem};$$

$$\frac{i_{\text{нг}}^D n_d}{i_{\text{O}_2}^B n_b} = \text{idem}; \quad \frac{d_0^D}{d_0^B} = \text{idem}, \quad (3)$$

где  $i_{\text{нг}}^D$  – импульс отдельного донного потока нейтрального газа;  $n_d$  – число донных фурм;  $d_0^D$  – диаметр окружности расположения донных фурм.

В случае верхней подачи двух регулируемых потоков кислорода через двухконтурные и двухъярусные фурмы специальных конструкций условия динамического подобия (1), (2) дополняются соотношениями

$$\frac{i_{O_2\text{доп}}^B \cos \alpha_{\text{доп}} n_{\text{доп}}^B}{i_{O_2\text{осн}}^B \cos \alpha_{\text{осн}} n_{\text{осн}}^B} = \text{idem}; \quad \frac{H_{\text{я}}}{d_{\text{вых}}^{\text{доп}}} = \text{idem}, \quad (4)$$

где  $i_{O_2\text{осн}}^B$  и  $i_{O_2\text{доп}}^B$  – импульсы основной и дополнительной кислородных струй;  $n_{\text{осн}}^B$  и  $n_{\text{доп}}^B$  – количество основных и дополнительных сопел в двухконтурной или двухъярусной фурмах;  $H_{\text{я}}$  – расстояние между ярусами основных и дополнительных сопел по стволу фурмы;  $d_{\text{вых}}^{\text{доп}}$  – диаметр выходного сечения дополнительного сопла.

Естественно, что условия динамического подобия (2)–(4) несколько различаются при высокотемпературном моделировании различных вариантов донной, верхней, боковой и комбинированной продувки конвертерной ванны технологическими газами, в том числе с подачей порошкообразных шлакообразующих материалов и углеродсодержащих теплоносителей, а также с дожиганием отходящих газов в полости агрегата. Однако во всех случаях при переносе полученных результатов с горячей модели на образец и наоборот учитывается геометрическое подобие рабочего пространства конвертера и конструкций дутьевых устройств.

Достижение подобия в определяющем конвертерный процесс взаимодействии дутья с ванной дает возможность с большей степенью достоверности переносить на образец полученные путем высокотемпературного моделирования данные о форме и размерах реакционной зоны, а также о протекающих в ней физико-химических процессах. Так, например, выполнение условия (2) при одинаковых начальных параметрах ведения конвертерной плавки (состав и температура перерабатываемого чугуна, удельный расход и режим присадки шлакообразующих материалов) ведет к равенству на модели и образце значений  $L_{\text{р.з}}/h_{\text{в}}$ ,  $D_{\text{р.з}}/D_{\text{ц}}$  (где  $L_{\text{р.з}}$  и  $D_{\text{р.з}}$  – глубина и диаметр реакционной зоны взаимодействия кислородных струй с металлическим расплавом), то есть к обеспечению идентичных условий в перераспределении вдуваемого кислорода между металлической, шлаковой и газовой фазами рабочего пространства конвертера. В этом случае при одинаковом температурном ходе операции характер поведения ванны при продувке (волно- и брызгообразование, дробление и сжигание объемов металла в кислородных струях, формирование отходящего из реакционной зоны потока газов, образование направленных циркуляционных потоков в объеме металлического расплава, вспененной шлакометаллической эмульсии и выбросов ее через горловину агрегата) одинаков на лабораторном и промышленном конвертерах. Здесь следует учитывать, что при равном удельном расходе кислорода на продувку  $G_{O_2}$ ,  $\text{м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$ , обеспечивающем при соблюдении вышеописанных условий подобия равенство на модели и образце числа гидродинамической гомохронности  $H_0 = \frac{w_{\text{тр}}}{l} = \text{idem}$  (характеризующего скорость изменения поля скоростей

течения среды во времени  $\tau_{\text{тр}}$ ), отношение  $\frac{i_{o,\Gamma}}{m_{\text{м}}g}$  для модели будет в  $C_l$  раз меньше, чем в образце (где  $i_{o,\Gamma}$  – импульс отходящего потока газов). Это и обуславливает то, что соотношение скоростей, например, потоков отходящего газа ( $w_{o,\Gamma}/w'_{o,\Gamma}$ ) и перемещающегося металла ( $w_{\text{м}}/w'_{\text{м}}$ ), высот подъема самой металлической ванны ( $H_{\text{м}}/H'_{\text{м}}$ ) и шлака ( $H_{\text{ш}}/H'_{\text{ш}}$ ) при вспенивании, высот общего уровня ванны ( $H_{\text{в}}/H'_{\text{в}}$ ) и подъема всплесков на поверхности расплава ( $H_{\text{вспл}}/H'_{\text{вспл}}$ ), размеров образующихся газовых макрообъемов и пузырей, брызг металла и шлака вполне удовлетворительно подчиняется зависимости

$$\frac{w_{o,\Gamma}}{w'_{o,\Gamma}} = \frac{w_{\text{м}}}{w'_{\text{м}}} = \frac{H_{\text{м}}}{H'_{\text{м}}} = \frac{H_{\text{ш}}}{H'_{\text{ш}}} = \frac{H_{\text{в}}}{H'_{\text{в}}} = \frac{H_{\text{вспл}}}{H'_{\text{вспл}}} = \frac{l}{l'} = C_l,$$

где  $l$  – характерный размер; верхний индекс «'» обозначает модель.

Для изучения гидрогазодинамики и хода конвертерной плавки в дальнейшем были разработаны новые методики наблюдения и фиксации фото- и киноаппаратурой происходящих при продувке ванны макрофизических явлений. Так, информация [10, 13, 19 – 21] о поведении реакционной зоны при воздействии верхних кислородных струй на конвертерную ванну, характере выхода из нее оксида углерода, состоянии поверхностных слоев отдаленных от фурмы участков ванны и механизме образования волн, выбросов, брызг и выноса при различных режимах дутья была получена путем фотокиносъемки через смотровое окно, выполненное выше стыка цилиндрической и конической частей лабораторного конвертера (рис. 1, а; 2, а). В случае предотвращения подсоса атмосферного воздуха в полость конвертера путем герметичной установки специальной смотровой трубы, закрытой прозрачным кварцевым стеклом (рис. 1, б), удается фиксировать [19, 21] процесс распространения кислородных струй в рабочем пространстве конвертера, взаимодействие их со встречным потоком выходящих из реакционной зоны газов и пыли, а также попадающими в струи брызгами металла и шлака (рис. 2, б).

Благодаря использованию конвертеров со смотровыми окнами (рис. 1, а, б), применению специальных приемов визуализации реакционной зоны и фотокиносъемки, удалось зафиксировать (рис. 2, а, б) макрокартину физических явлений на поверхности продуваемой конвертерной ванны [10, 12, 13, 19 – 21] даже в периоды интенсивного дымообразования, что не удавалось при проведении экспериментов на открытой индукционной печи емкостью 50 кг [8].

При выполнении футеровки конвертера в цилиндрической части из прозрачного кварцевого стекла (рис. 1, в) появилась возможность изучать структуру, изменение уровня конвертерной ванны и фиксировать температурную неоднородность последней по высоте

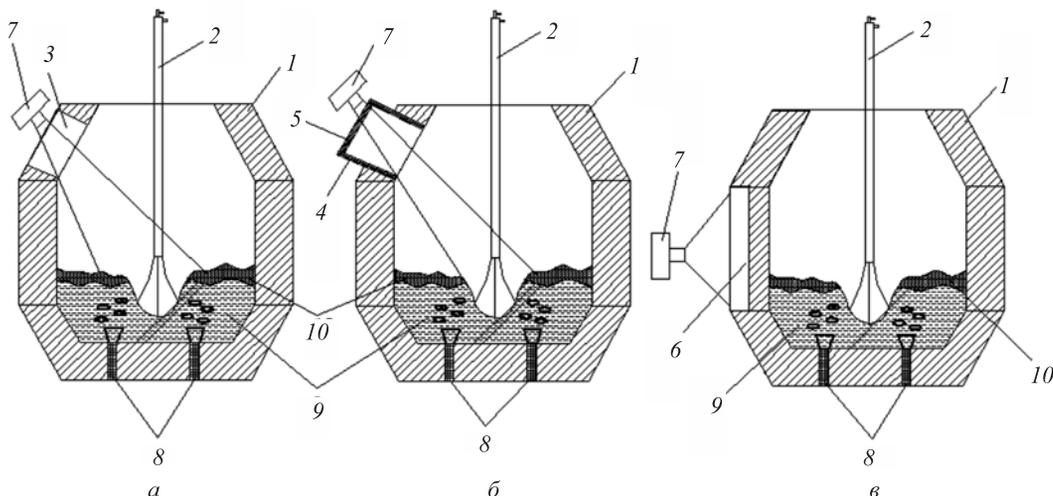


Рис. 1. Схема осуществления опытов по изучению гидрогазодинамики конвертерного процесса на горячей модели с использованием смотрового окна (а), смотровой трубы (б) и прозрачной стенки (в):  
 1 – конвертер; 2 – кислородная фурма; 3 – смотровое окно; 4 – смотровая труба; 5 – кварцевое стекло; 6 – прозрачная кварцевая стенка; 7 – кинокамера; 8 – донные фурмы; 9 – металл; 10 – шлак

Fig. 1. The scheme of test realization of the research of converter process hydrogasdynamics on the hot model using observation window (а), sight tube (б) and transparent wall (в):  
 1 – converter; 2 – oxygen tuyere; 3 – viewing window; 4 – observation tube; 5 – quartz glass; 6 – transparent quartz wall; 7 – film camera; 8 – bottom tuyere; 9 – metal; 10 – slag

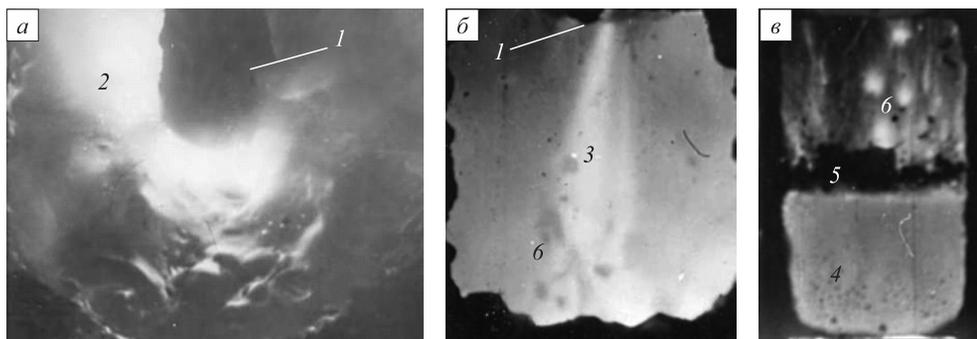


Рис. 2. Макрофизические явления на поверхности конвертерной ванны (а, б) и границе раздела шлак–металл (в) при верхней продувке:  
 1 – одноносовая кислородная фурма; 2 – факел догорающего оксида углерода; 3 – дожигание оксида углерода, вовлеченного в кислородную струю; 4 – металлическая ванна; 5 – шлак; 6 – брызги металла и шлака

Fig. 2. Macrophysical phenomena on the surface of a converter bath (а, б) and the interface of slag–metal (в) at the top blowing:  
 1 – single-nozzle oxygen tuyere; 2 – torch of the burning down carbon multioxide; 3 – after-burning of carbon oxide, involved in an oxygen jet; 4 – metal bath; 5 – slag; 6 – metal and slag sprays

(рис. 2, в). Разработанная методика прозрачной стенки конвертера позволила впервые получить достоверную информацию [11, 12, 22, 23] о состоянии и перемещении границы раздела шлак – металл при различных способах продувки, а следовательно, о степени вспенивания металлической и шлаковой фаз в конвертере и механизме образования выбросов. В этом случае контроль общего уровня конвертерной ванны  $H'_в$  при продувке осуществляли путем замера высоты замороженной металлошлаковой «рубашки» на металлическом стержне пробоборочного устройства после извлечения его из конвертера, а уровня металлической ванны  $H'_м$  – по кадрам фотокиносъемки (рис. 2, в) перемещения границы раздела шлак–металл [11, 12].

При верхней кислородной продувке передельного чугуна впервые установлено [11, 12], что на протяжении операции вспенивается только шлак за счет газыделения в объеме последнего при обезуглероживании корольков металла, а уровень металлической ванны  $H'_м$  даже монотонно понижается в результате окисления примесей и части железа, а также эмульгирования металла в шлаковую фазу. Согласно проведенным оценкам снижение величины  $H'_м$  достигает 16 % от первоначального уровня металла в спокойном состоянии  $H_0$ . В то же время высота вспененного слоя шлака может превышать в 5,8 – 6,5 раза значения  $H_0$ .

При выбранной конструкции наконечника фурмы основным управляющим воздействием на состояние

ванны при верхней продувке (образование газошлакометаллической эмульсии, подавление выбросов) является изменение интенсивности кислородного дутья и уровня расположения фурмы  $H_{\phi}$  над металлической ванной в спокойном состоянии, что позволяет перераспределять вдуваемый кислород на реакции между металлом и шлаком. Установлено [11, 12, 23], что при содержании углерода в ванне более 0,3 % продолжительная по времени продувка в «мягком» режиме (высота обычной фурмы 40 – 60 диаметров сопла) ведет к интенсивному образованию газошлакометаллической эмульсии, к заполнению ею внутреннего объема конвертера и к созданию ощутимых затруднений в отводе основного потока оксида углерода, выходящего из пределов реакционной зоны. В этих условиях, как зафиксировано киносъемкой [23], выход газов из реакционной зоны на поверхность ванны приобретает взрывной характер, когда за незначительным по времени периодом накопления газов в околосурфурной зоне следует энергичный прорыв окружающей оболочки вспененной шлакометаллической эмульсии с выбросом ее через горловину агрегата.

Условия вспенивания шлака и металлического расплава при комбинированной верхне-донной кислородной продувке, а следовательно, и механизм такого вспенивания и образования выбросов, а также колебание поверхности металлической ванны, как установлено в работах [20, 23], принципиально отличны от условий, характерных для верхней кислородной продувки, а также для комбинированной продувки с подачей кислорода сверху и нейтрального перемешивающего газа через днище.

Была усовершенствована впервые примененная в работе [9] методика визуализации реакционной зоны, развивающейся при взаимодействии с металлическим расплавом направленной вдоль прозрачной кварцевой стенки кислородной струи, благодаря чему удалось с использованием киносъемки и метода фотографической пирометрии [15] фиксировать более четко структурные составляющие реакционной зоны и температурную неоднородность в ней как при кислородной (рис. 3), так и при кислородно-порошковой (рис. 4) продувке.

При продувке железоуглеродистого расплава в реакторах с прозрачной кварцевой стенкой [15] подтверждены ранее полученные сведения [8, 9] о правомочности деления реакционной зоны (рис. 3) на первичную ( $I_{p.3}$ ), в которой преимущественно развивается процесс сжигания вовлеченных во внедренную в ванну кислородную струю объемов металла, его примесей и оксида углерода, и вторичную ( $II_{p.3}$ ), где происходит взаимодействие образующихся в основном в первичной реакционной зоне оксидов железа, а также неусвоенного на пути внедрения в ванну газообразного кислорода со свежим расплавом с выделением оксида углерода.

В пределах общей реакционной зоны (рис. 3) фиксируются очертания внедряющейся струи ( $I_{p.3}$ ), взаимодействующей с вовлекаемыми в нее объемами металла, а также встречным потоком отходящих отдельными прорывами газов, образующихся во вторичной реакционной зоне и препятствующих проникновению струи. В результате этого взаимодействия наблюдается пульсирующий характер проникновения струи в расплав с периодичностью 0,10 – 0,15 с, изменение в ходе продувки угла раскрытия (в пределах 12 – 23°) и размеров струй-

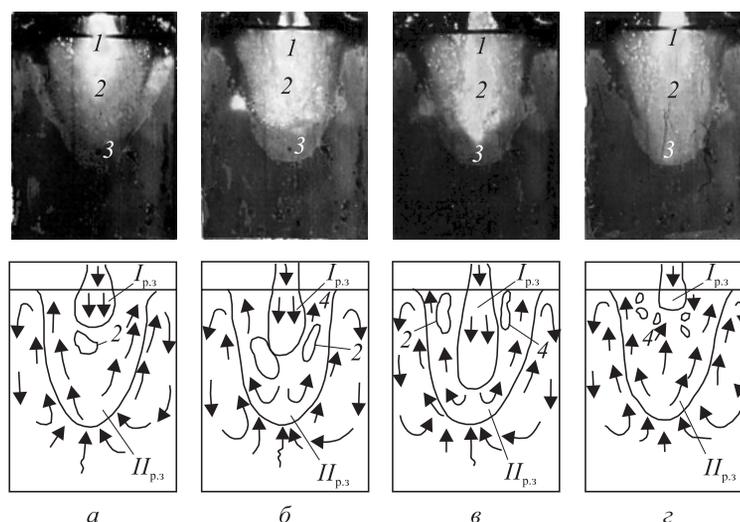


Рис. 3. Картина и схема пульсации железоуглеродистого струйного участка первичной реакционной зоны ( $I_{p.3}$ ) при продувке расплава ( $[C] = 3,2\%$ ) одиночной кислородной струей в различные моменты времени (а – з):

1 – уровень металла в спокойном состоянии; 2 – струйный участок  $I_{p.3}$ ; 3 – вторичная реакционная зона  $II_{p.3}$ ; 4 – всплывающие макрообъемы оксида углерода

Fig. 3. Iron-carbon jet section pulsation of the primary reaction zone ( $I_{p.3}$ ) when blowing the melt ( $[C] = 3.2\%$ ) with a single oxygen jet at various time points (a – z):

1 – metal level in a calm state; 2 – jet section of  $I_{p.3}$ ; 3 – second reaction zone  $II_{p.3}$ ; 4 – floatable microvolume of carbon oxide

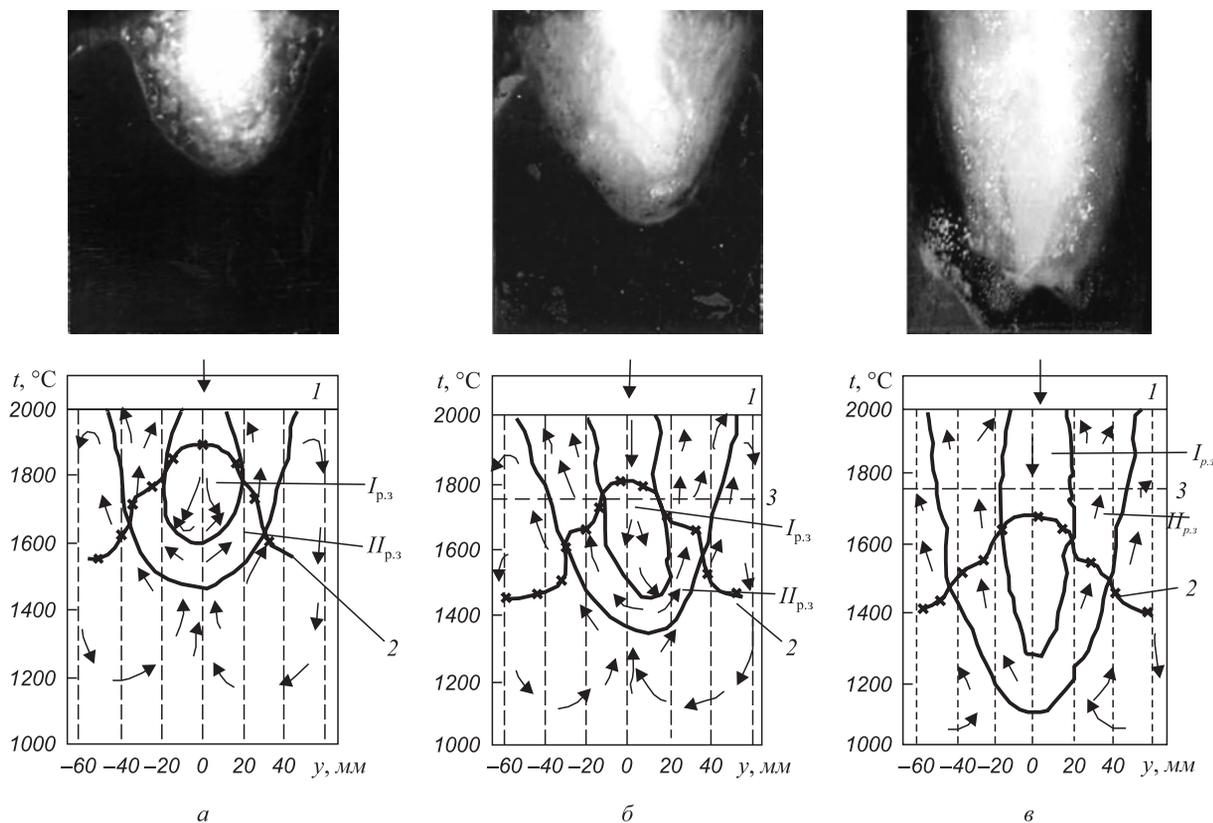


Рис. 4. Макрокартина реакционной зоны и схема распределения в ней ( $y$  – расстояние от оси внедрения струи в расплав) потоков и температур при продувке железуглеродистого расплава ( $[C] = 3,5 \%$ ) кислородной ( $a$ ) и кислородно-порошковыми ( $b, v$ ) струями при добавке в кислородную струю  $1 \text{ кг/м}^3 \text{ CaO}$  ( $b$ ) и  $2 \text{ кг/м}^3 \text{ Fe}_2\text{O}_3$  ( $v$ ):  
 1 – уровень металла в спокойном состоянии; 2 – температурная кривая в сечении

Fig. 4. Macropicture of the reaction zone and the distribution scheme of streams and temperatures in it ( $y$  – distance from the implantation axis of the jet into the melt) when blowing an iron-carbon melt ( $[C] = 3,5 \%$ ) with oxygen ( $a$ ) and oxygen-powder ( $b, v$ ) jets at addition into the oxygen jet of  $1 \text{ kg/m}^3$  of  $\text{CaO}$  ( $b$ ) and  $2 \text{ kg/m}^3$  of  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $v$ ):  
 1 – metal level in calm state; 2 – temperature curve in the cross-section

ного участка реакционной зоны (рис. 3). Установлено, что максимальный угол раскрытия струйного участка и минимальная глубина этого участка соответствовали моменту наибольшего сопротивления внедрению кислородной струи со стороны выходящего потока газа при формировании его прорыва из реакционной зоны. В начальный период накопления газа в пределах реакционной зоны длина струйного участка максимальна, а угол его раскрытия минимален и практически равен углу раскрытия кислородной струи до внедрения в ванну.

Впервые с использованием модернизированной методики визуализации реакционной зоны и метода фотографической пирометрии [15] удалось оценить температурную неоднородность различных участков реакционной зоны с вдуванием в железуглеродистый расплав кислородной струи (рис. 4,  $a$ ), а также исследовать влияние добавок различных порошкообразных материалов в кислородную струю на структуру, размеры и температурную неоднородность реакционной зоны (рис. 4,  $b, v$ ). Кислородно-порошковая продувка расплавов сопровождалась во всех случаях изменением конфигурации образующейся реакционной зоны, выразившимся в заострении

очертаний реакционных зон  $I_{p.3}$  и  $II_{p.3}$  по глубине, а также большей стабилизацией струйного участка.

С использованием полученных экспериментальных данных о структуре и параметрах реакционных зон, образуемых при продувке конвертерной ванны кислородными и кислородно-порошковыми струями, разработана методика проектирования верхних обычных и многоконтурных фурм различного назначения [24, 25].

С целью изучения механизма и интенсивности развития процесса окисления шлакообразующих примесей (кремния, марганца, фосфора) в реакционной зоне взаимодействия кислородной струи с ванной, в объемах шлакометаллической эмульсии и металлической ванны получила свое дальнейшее развитие методика двухкамерного конвертера [6], применявшаяся для изучения реакции обезуглероживания [2 – 5]. Усовершенствованная методика экспериментов [6] заключалась в последовательном выделении из сопоставляемых областей конвертерной ванны зоны преобладающего окисления шлакообразующих примесей. Установлено, что окисление кремния и марганца происходит преимущественно в пределах реакционной зоны по двухстадийной схеме,

предполагающей первичное образование в основном оксидов железа с последующим их расходом на реакции рафинирования в пределах ограниченного объема вторичной реакционной зоны. Удаление фосфора преимущественно развивается на границе соприкосновения металла с основным железистым шлаком, то есть в объеме газшлакометаллической эмульсии и непосредственно на границе раздела шлак–металлическая ванна. Аналогичные результаты, в том числе подтверждающие двухстадийную схему окисления углерода, кремния и марганца в пределах реакционной зоны, были получены позднее с использованием методики изучения продуктов содержимого реакционной зоны [14].

В дальнейших экспериментах с целью визуализации и оценки гидрогазодинамических и тепломассообменных процессов, протекающих в каждой из камер конвертера при верхней и комбинированной продувках, передняя стенка агрегата была выполнена из прозрачного кварцевого стекла (рис. 5, а), а огнеупорная перегородка вплотную примыкала к нему. На горловину конвертера устанавливали крышку, которая вместе с перегородкой (как и в исследовании [5]) обеспечивала изоляцию реакционной камеры от сравнительной, при этом каждая камера сообщалась с атмосферой лишь через специальные, прорезанные в крышке отверстия для выхода газов.

По ходу продувки через отверстия в крышке из обеих камер отбираются пробы металла и шлака с одновре-

менной фиксацией общего уровня ванны  $[H_B]$  и уровня металлической ванны  $[H_M]$  в реакционной и сравнительной камерах (индексы «р» и «с» соответственно), а также с помощью стационарных термопар измеряется температура ванны (рис. 5, б). По результатам анализа проб металла и шлака оценивается ход рафинирования металла в каждой из камер. Также показателем интенсивности протекания обезуглероживания расплава в пределах реакционной и сравнительной камер служат длины факелов ( $L_{\text{фак}}$ ) (рис. 5, б) догорания выделяющегося оксида углерода, которые фиксируются с определенным временным интервалом (рис. 6, а). Дополнительно фиксируется информация о температурной неоднородности металлической ванны и перемещении

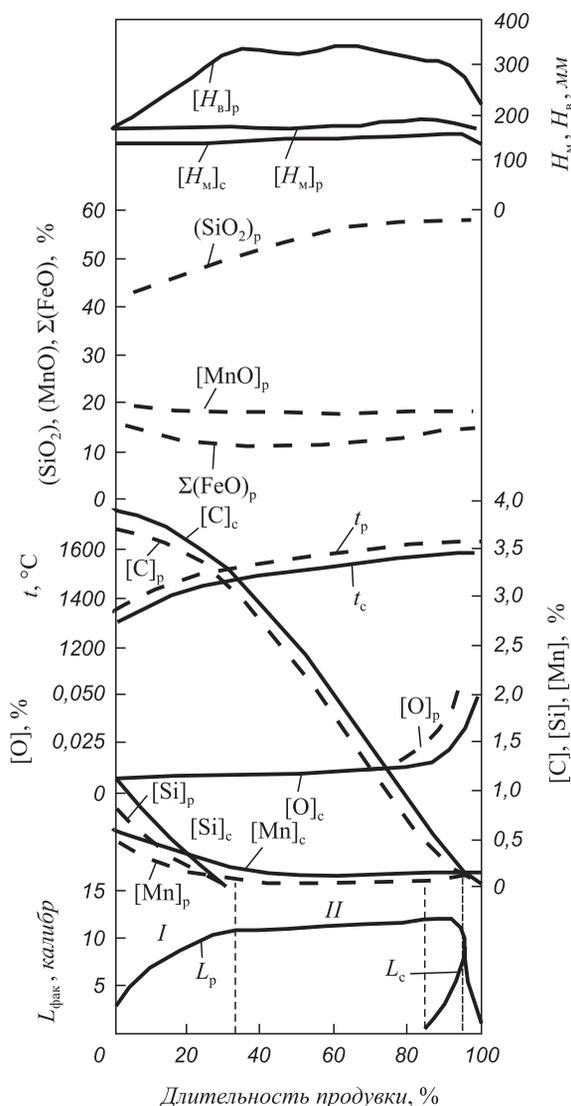
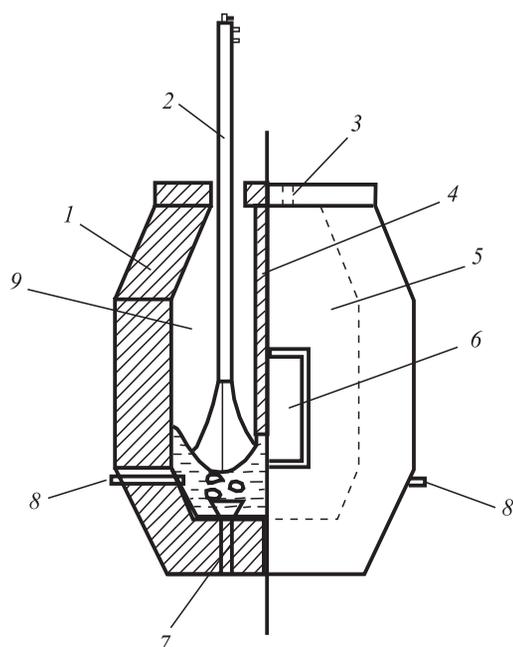


Рис. 5. Устройство двухкамерного конвертера (а) и ход рафинирования чугуна (б) в нем при комбинированной продувке с расходом кислорода  $3 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{мин})$  и азота  $0,08 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{мин})$ :

1 – конвертер; 2 – верхняя фурма; 3 – калиброванные отверстия в крышке; 4 – огнеупорная перегородка; 5 и 9 – сравнительная и реакционная камеры; 6 – кварцевая стенка; 7 – донные фурмы; 8 – термопары

Fig. 5. Design of the double-chamber converter (а) and the process of cast-iron refining (б) in it at combined blowing with the consumption of oxygen of  $3 \text{ м}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$  and nitrogen of  $0,08 \text{ м}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$ :

1 – converter; 2 – top tuyere; 3 – calibrated orifices in the cover; 4 – fire-proof partition; 5 and 9 – comparative and reaction chambers; 6 – quartz walls; 7 – bottom tuyere; 8 – thermocouples

перегретых потоков расплава из реакционной камеры в сравнительную (рис. 6, б) благодаря фотокиносъемке протекающих физических процессов через прозрачную кварцевую стенку конвертера.

Вышеописанная методика позволила на более высоком уровне в сравнении с работой [6] впервые осуществить комплекс высокотемпературных экспериментов по количественной оценке окисления примесей и тепломассопереноса в различных реакционных зонах конвертерной ванны при верхней кислородной продувке [22, 26] и комбинированной продувке [24, 25] кислородом и нейтральным газом (рис. 6).

Разработанный комплекс методик и установок высокотемпературного моделирования продувки конвертерной ванны в настоящее время с успехом используется для разработки и совершенствования новых технологий комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом и нейтральным газом и фурменных устройств для их реализации [27].

**Выводы.** Разработаны и обоснованы основные положения методики высокотемпературного моделирования различных вариантов продувки конвертерной ванны с предложением чисел динамического подобия, позволяющих с большей достоверностью переносить полученные данные с модели на образец. Предложены

практические варианты подхода к изучению гидродинамических и тепломассообменных процессов, протекающих в основных реакционных зонах рабочего пространства конвертера при верхней и комбинированной продувках.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коотц Т., Беренс К., Маас Г., Баумгартен П. Некоторые вопросы теории кислородно-конвертерного процесса // Черные металлы. 1965. № 14. С. 8 – 17; № 15. С. 42 – 52.
2. Borowski K., Maatsch J. // Techn. Mitt. Krupp, Forsch.-Ber. 1964. Vol. 22. S. 63, 64.
3. Лопухов Г.А., Самарин А.М. Кинетика объемного и поверхностного обезуглероживания при продувке чугуна кислородом. – В кн.: Физико-химические основы производства стали. – М.: Наука, 1971. С. 287 – 291.
4. Лопухов Г.А., Клибанов Е.Л. Некоторые закономерности окислительных процессов при продувке чугунов // Изв. АН СССР. Металлы. 1972. № 5. С. 3 – 9.
5. Охотский В.Б., Чернятевич А.Г., Просвирин К.С. Зона преимущественного рафинирования металла при продувке ванны кислородом. – В кн.: Сталеплавильное производство: Тематич. отраслевой сб. МЧМ СССР. – М.: Металлургия, 1974. № 3. С. 75 – 82.
6. Зарвин Е.Я., Чернятевич А.Г., Волович М.И. О месте преимущественного окисления шлакообразующих примесей при продувке металла кислородом // Изв. вуз. Черная металлургия. 1975. № 2. С. 22 – 27.

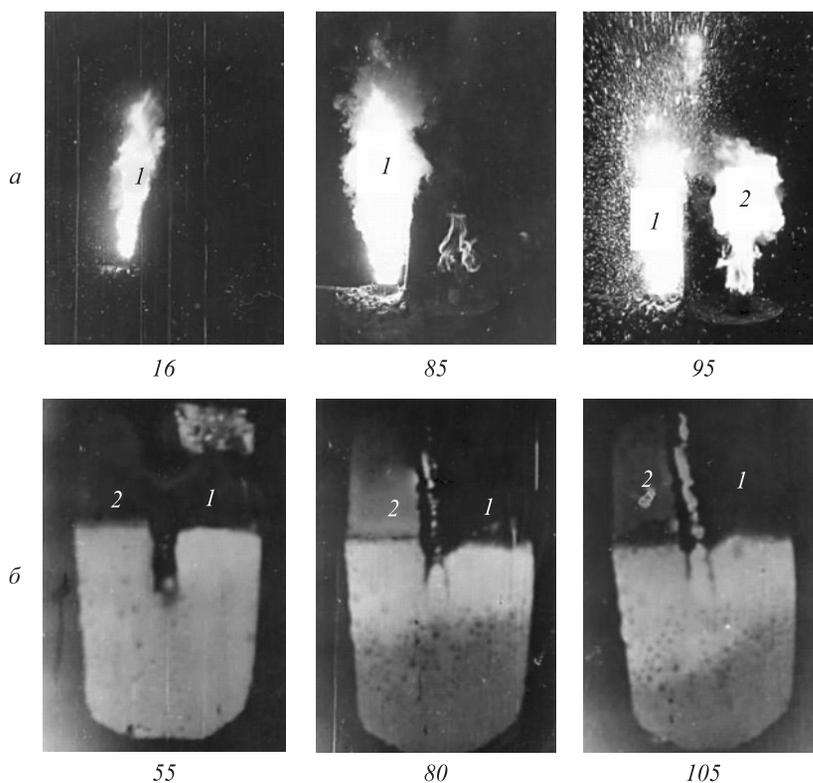


Рис. 6. Картина образования факелов (а, под фотографиями время от начала продувки, %) над реакционной (1) и сравнительной (2) камерами и перемещение перегретых потоков расплава из реакционной в сравнительную камеры (б, под фотографиями время от начала продувки, с)

Fig. 6. Torch formation (a, under the pictures – the time from the beginning of blowing, %) above the reaction (1) and comparative (2) chambers and the transfer of overheated jets of the melt from the reaction into the comparative chamber (б, under the pictures – the time from the beginning of blowing, s)

7. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В., Ганзер Л.А. О некоторых особенностях окисления примесей в конвертерной ванне при комбинированной продувке // Изв. вуз. Черная металлургия. 1987. № 4. С. 25 – 30.
8. Охотский В.Б., Чернятевич А.Г., Просвирин К.С. Изучение процесса взаимодействия кислородной струи с металлической ванной // Изв. вуз. Черная металлургия. 1972. № 6. С. 57 – 60.
9. Охотский В.Б., Баптизмандский В.И., Просвирин К.С., Щедрин Г.А. Строение реакционной зоны при продувке металла кислородом // Изв. вуз. Черная металлургия. 1973. № 8. С. 50 – 53.
10. Зарвин Е.Я., Чернятевич А.Г., Волович М.И. и др. Изучение процесса продувки конвертерной ванны с использованием фотокиносъемки // Изв. вуз. Черная металлургия. 1974. № 12. С. 33 – 37.
11. Зарвин Е.Я., Чернятевич А.Г., Волович М.И. Наблюдение через прозрачную стенку за поведением конвертерной ванны при продувке // Изв. вуз. Черная металлургия. 1975. № 2. С. 37 – 42.
12. Чернятевич А.Г., Зарвин Е.Я., Борисов Ю.Н., Волович М.И. О механизме образования выбросов из кислородного конвертера с верхней продувкой // Изв. вуз. Черная металлургия. 1976. № 10. С. 54 – 59.
13. Чернятевич А.Г., Зарвин Е.Я., Борисов Ю.Н. и др. Макрокартина физических явлений в реакционной зоне кислородного конвертера при продувке многосопловыми фурмами // Изв. вуз. Черная металлургия. 1977. № 12. С. 61 – 65.
14. Баптизмандский В.И., Охотский В.Б., Просвирин К.С. и др. Исследование физико-химических процессов в реакционной зоне при продувке металла кислородом // Изв. вуз. Черная металлургия. 1977. № 6. С. 51 – 54; № 10. С. 24 – 26.
15. Чернятевич А.Г., Зарвин Е.Я., Соломон Г.М. О структуре реакционной зоны при продувке металла кислородной и кислородно-порошковой струями // Изв. вуз. Черная металлургия. 1978. № 10. С. 72 – 77; № 12. С. 33 – 36.
16. Чернятевич А.Г., Зарвин Е.Я. К вопросу горячего моделирования кислородно-конвертерного процесса // Изв. вуз. Черная металлургия. 1978. № 4. С. 40 – 46.
17. Чернятевич А.Г. Высокотемпературное моделирование кислородно-конвертерного процесса // Изв. вуз. Черная металлургия. 1991. № 12. С. 16 – 18.
18. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Условия подобия при высокотемпературном моделировании кислородных процессов. Аэрогидродинамическое подобие // Изв. вуз. Черная металлургия. 1997. № 8. С. 26 – 31.
19. Чернятевич А.Г., Шишов Б.И. Некоторые вопросы распространения кислородных струй в рабочем пространстве конвертера // Изв. вуз. Черная металлургия. 1981. № 1. С. 28 – 32; № 3. С. 42 – 45.
20. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В. Экспериментальное изучение параметров реакционной зоны конвертерной ванны в условиях комбинированной продувки // Изв. вуз. Черная металлургия. 1991. № 6. С. 17 – 22.
21. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Исследование взаимодействия кислородных струй с отходящими конвертерными газами // Изв. вуз. Черная металлургия. 1996. № 10. С. 5 – 9.
22. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Юдин С.В. Исследование химических и температурных градиентов в конвертерной ванне с использованием высокотемпературного моделирования // Изв. вуз. Черная металлургия. 1997. № 10. С. 20 – 24.
23. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Юдин С.В. Гидродинамические особенности поведения конвертерной ванны при различных способах продувки // Изв. вуз. Черная металлургия. 1998. № 8. С. 23 – 29.
24. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В. Разработка наконечников двухконтурных фурм для кислородных конвертеров // Изв. вуз. Черная металлургия. 1995. № 12. С. 13 – 17.
25. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Лаврик Д.А., Мастеровенко Е.Л. Исследование структуры и параметров реакционных зон при верхней продувке применительно к проектированию многоцелевых конвертерных фурм // Изв. вуз. Черная металлургия. 2002. № 12. С. 16 – 21.
26. Зарвин Е.Я., Соломон Г.М., Волович М.И. Особенности массопереноса элементов в условиях верхней кислородной продувки // Изв. вуз. Черная металлургия. 1982. № 6. С. 29 – 34.
27. Фейлер С.В., Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г. Совершенствование технологии комбинированной продувки конвертерной ванны кислородом и нейтральным газом // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 4. С. 43 – 50.

Поступила 10 февраля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. VOL. 58. NO. 5, PP. 299–308.

## CONTRIBUTION OF THE CHAIR OF FERROUS METALLURGY TO THE DEVELOPMENT OF THE THEORY AND TECHNIQUE OF HIGH-TEMPERATURE MODELING OF CONVERTER BATH BLOWING

*Protopopov E.V.<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of ferrous metallurgy, Rector*

*Chernyatevich A.G.<sup>2</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of “Physical and technical problems of steel metallurgy”*

*Feiler S.V.<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of ferrous metallurgy (feylel@rdtc.ru)*

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

<sup>2</sup> **Institute of ferrous metallurgy of the National Academy of Science of Ukraine** (Academika Starodubova sqr., Dnepropetrovsk, 49050, Ukraine)

**Abstract.** The paper presents the results of developing and improving the systems and methods of high-temperature hydrogasdynamic and mass transfer modeling of top and combined blowing in a converter bath. The role of the Chair “Ferrous Metallurgy” of Siberian State Industrial University in the development of theoretical aspects of blowing the metal

melt in converter with gas jets has been shown. Owing to the use of converters with viewing windows, the usage of special techniques of visualization of the reaction zone and a video, it has been able to observe and record the picture of physical phenomena on the surface of the blown bath converter with the video camera. The developed technique of a converter transparent wall has allowed obtaining reliable information on the condition and movement of slag-metal interface at various ways of blowing and formation mechanism of emissions. The developed and proved main propositions of the methodology of high-temperature simulation of different options of converter bath blowing with a proposal of the dynamic similarity criteria allow with high confidence to transfer the data obtained from the model for the industrial design. Practical options of the approach have been proposed to study hydrogasdynamic and heat-and-mass transfer processes occurring in the main reaction zones of a converter workspace at the top and combined blowing.

**Keywords:** high-temperature modeling, top and combined blowing, converter bath, reaction zone, hydraulic gas dynamics, heat-and-mass transfer.

**DOI:** 10.15825/0368-0797-2015-5-299-308

## REFERENCES

1. Kootts T., Berens K., Maas G., Baumgarten P. Some issues of the theory of basic oxygen processes. *Chernye metally*. 1965, no. 14, pp. 8–17; no. 15, pp. 42–52. (In Russ.).
2. Borowski K., Maatsch J. *Techn. Mitt. Krupp, Forsch.-Ber.* 1964, Vol. 22, pp. 63–64.
3. Lopukhov G.A., Samarin A.M. *Kinetika ob"emnogo i poverkhnostnogo obezuglerozhivaniya pri produvke chuguna kislorodom* [Kinetics of volume and surface decarbonization at blowing of cast iron with oxygen]. In: *Fiziko-khimicheskie osnovy proizvodstva stali* [Physicochemical basis of steel production]. Moscow: Nauka, 1971, pp. 287–291. (In Russ.).
4. Lopukhov G.A., Klibanov E.L. Some peculiarities of oxidizing processes at cast iron blowing. *Izv. AN SSSR. Metall.* 1972, no. 5, pp. 3–9. (In Russ.).
5. Okhotskii V.B., Chernyatevich A.G., Prosvirin K.S. *Zona preimushchestvennogo rafinirovaniya metalla pri produvke vanny kislorodom* [Zone of a preferential metal refining at bath blowing with oxygen]. In: *Staleplavil'noe proizvodstvo: Tematich. otraslevoi sb. MChM SSSR* [Steelmaking: Thematic applied-research collection of Ferrous Metal Metallurgy in USSR]. Moscow: Metallurgiya, 1974, no. 3, pp. 75–82. (In Russ.).
6. Zarvin E.Ya., Chernyatevich A.G., Volovich M.I. The position of a preferential oxidation of slag-making impurities when metal blowing with oxygen. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1975, no. 2, pp. 22–27. (In Russ.).
7. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V., Ganzer L.A. Some peculiarities of impurities oxidation in a converter bath at combined blowing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1987, no. 4, pp. 25–30. (In Russ.).
8. Okhotskii V.B., Chernyatevich A.G., Prosvirin K.S. The research of the interaction process of an oxygen jet with metal bath. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1972, no. 6, pp. 57–60. (In Russ.).
9. Okhotskii V.B., Baptizmanskii V.I., Prosvirin K.S., Shchedrin G.A. Construction of the reaction zone at metal blowing with oxygen. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1973, no. 8, pp. 50–53. (In Russ.).
10. Zarvin E.Ya., Chernyatevich A.G., Volovich M.I., Nikitin Yu.P., Doroshenko V.A. The research of blowing processes of a converter bath with filming use. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1974, no. 12, pp. 33–37. (In Russ.).
11. Zarvin E.Ya., Chernyatevich A.G., Volovich M.I. Converter bath behavior observation through the transparent wall at the blowing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1975, no. 2, pp. 37–42. (In Russ.).
12. Chernyatevich A.G., Zarvin E.Ya., Borisov Yu.N., Volovich M.I. The emission formation mechanism of an oxygen converter with a top blowing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1976, no. 10, pp. 54–59. (In Russ.).
13. Chernyatevich A.G., Zarvin E.Ya., Borisov Yu.N., Shishov B.I., Solomon G.M., Volovich M.I. Micropicture of physical phenomena in the reaction zone of an oxygen converter when blowing with multinozzle tuyere. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1977, no. 12, pp. 61–65. (In Russ.).
14. Baptizmanskii V.I., Okhotskii V.B., Prosvirin K.S., Shchedrin G.A., Ardelyan Yu.A., Velichko A.G. The research of physicochemical processes in the reaction zone at metal blowing with oxygen. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1977, no. 6, pp. 51–54; no. 10, pp. 24–26. (In Russ.).
15. Chernyatevich A.G., Zarvin E.Ya., Solomon G.M. The structure of the reaction zone at metal blowing with oxygen and oxygen powder jets. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1978, no. 10, pp. 72–77; no. 12, pp. 33–36. (In Russ.).
16. Chernyatevich A.G., Zarvin E.Ya. The issue of a hot modelling of an oxygen-converter process. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1978, no. 4, pp. 40–46. (In Russ.).
17. Chernyatevich A.G. High-temperature modeling of oxygen-converter process. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1991, no. 12, pp. 16–18. (In Russ.).
18. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. Similarity conditions at a high-temperature modeling of oxygen processes. Aerohydrodynamic similarity. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1997, no. 8, pp. 26–31. (In Russ.).
19. Chernyatevich A.G., Shishov B.I. Some issues of an oxygen jet distribution in a converter workspace. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1981, no. 1, pp. 28–32; no. 3, pp. 42–45. (In Russ.).
20. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V. The experimental research of the reaction zone parameters of converter bath in the conditions of combined blowing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1991, no. 6, pp. 17–22. (In Russ.).
21. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. The interaction research of oxygen jets with end converter gases. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1996, no. 10, pp. 5–9. (In Russ.).
22. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Yudin S.V. The research of chemical and temperature gradients in converter bath with the use of a high-temperature modeling. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1997, no. 10, pp. 20–24. (In Russ.).
23. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Yudin S.V. Hydrodynamic peculiarities of converter bath behavior at different ways of blowing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1998, no. 8, pp. 23–29. (In Russ.).
24. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V. Tip development of double-circuit tuyere for oxygen converters. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1995, no. 12, pp. 13–17. (In Russ.).
25. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Lavrik D.A., Masterovenko E.L. The research of structure and parameters of the reaction zone at the top blowing according to the development of multipurpose converter tuyere. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2002, no. 12, pp. 16–21. (In Russ.).
26. Zarvin E.Ya., Solomon G.M., Volovich M.I. Mass transfer peculiarities of the elements in the conditions of a top oxygen blowing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1982, no. 6, pp. 29–34. (In Russ.).
27. Feiler S.V., Protopopov E.V., Chernyatevich A.G. Improvement of combined blowing processes in converter bath by oxygen and neutral gas. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 4, pp. 43–50. (In Russ.).

Received February 10, 2015

УДК 669.168

## ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАРГАНЕЦСОДЕРЖАЩИХ РУД И РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ КОНЦЕНТРАТОВ\*

*Нохрина О.И.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургии  
черных металлов (kafamsf@sibsiu.ru)*

*Рожихина И.Д.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов*

*Прошунин И.Е.<sup>2</sup>, к.т.н., начальник управления по качеству*

*Ходосов И.Е.<sup>1</sup>, заведующий лабораториями кафедры металлургии черных металлов*

<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет

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

<sup>2</sup> ОАО «ЕВРАЗ – Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»

(654043, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, Космическое шоссе, 16)

**Аннотация.** В пределах Алтае-Саянской металлогенической провинции выявлены проявления марганцевых руд, которые можно отнести к полиметаллическим рудам, но из-за высокого содержания фосфора и железа они не могут быть использованы для выплавки стандартных сплавов без предварительного обогащения. Термодинамические расчеты и экспериментальные исследования по обогащению полиметаллического марганецсодержащего сырья позволили определить основные технологические параметры извлечения компонентов и разработать технологическую схему обогащения. По предложенной технологической схеме возможно получение высококачественных концентратов марганца, никеля, железа, кобальта. Применение оптимальных технологических параметров обогащения позволяет из полиметаллического марганецсодержащего сырья извлекать до 95 – 97 % Mn, 98 – 99 % Ni, 96 – 98 % Fe, 60 % Co. Показано, что марганцевый концентрат целесообразно использовать для выплавки марганца металлического и сталей с низким содержанием фосфора, что позволит снизить зависимость от импорта марганецсодержащих материалов. Разработана технология легирования стали с использованием полученного концентрата никеля, при этом замена никеля металлического его концентратом значительно сократит расходы на легирование. Разработана технология получения металлизированного железа методом твердофазного восстановления из железного концентрата, что позволит снизить содержание вредных примесей в стали.

**Ключевые слова:** полиметаллические марганецсодержащие руды, высококачественный марганцевый концентрат, никелевый концентрат, металлизированный продукт, обогащение, марганец металлический, прямое легирование, стали.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-309-315

Производство стали подавляющего большинства марок не может обойтись без марганцевых ферросплавов. Содержание марганца в сталях обычно составляет от 0,5 до 2,0 %, а в некоторых и до 13,0 %.

Потребление марганцевых сплавов в России постоянно растет и на настоящий момент составляет около 650 тыс. т в год. В 2012 г. в стране произведено 302 тыс. т марганцевых сплавов, что для отечественной промышленности составляет 47 % от необходимого объема. Недостающее (более 50 %) количество сплавов импортируется из Украины, Казахстана, Китая.

Потребности российской промышленности в марганцевом сырье удовлетворяются практически в полном объеме за счет импорта. В последние годы в страну ввозится 800 – 1000 тыс. т марганцевых руд ежегодно преимущественно из Казахстана, а также Бразилии, ЮАР, Турции.

В России имеются значительные (более 290 млн. т) балансовые запасы марганцевых руд, но марганце-

вые руды большинства отечественных месторождений отличаются невысоким качеством: при низком (18 – 33 %) содержании марганца и высоком (отношение содержаний P/Mn > 0,006) удельном содержании фосфора, повышенном содержании железа и кремнезема относятся к труднообогатимым. При этом около 90 % балансовых запасов приходится на карбонатное сырье [1, 2].

В последние годы были выявлены проявления качественных марганцевых руд в пределах Алтае-Саянской металлогенической провинции: участок Аскиз в республике Хакасия; участок Сунгай в Алтайском крае; участок Сугул в республике Алтай; Селезенское месторождение и участок Чумай, расположенные в Таштагольском и Тисульском районах Кемеровской области. При этом марганцевые руды месторождений Сугул и Чумай следует отнести к полиметаллическим рудам. Химический состав марганцевых руд этих месторождений приведен в табл. 1, из которой следует, что в рудах участка Сугул содержание марганца не превышает 21,0 %, а в рудах участка Сумай достаточно большое

\* Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Минобрнауки РФ.

**Химический анализ марганцевых руд**

*Table 1. Chemical analysis of manganese ores*

Участок	Содержание, % (по массе)												
	Mn <sub>общ</sub>	Fe <sub>общ</sub>	P	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	BaO	Ni	Co	Cu
Аскиз	52,90	2,1	0,03	11,50	0,63	2,60	1,06	–	–	–	–	–	–
Чумай	54,60	4,6	0,20	7,52	0,76	1,94	–	–	–	0,07	0,5	3,0	0,2
Сугул	20,40	2,0	0,04	50,60	0,75	6,96	0,77	–	–	0,10	0,5	3,0	0,7
Сунгай	33,54	4,1	0,06	31,50	1,00	5,68	0,48	–	–	–	–	–	–
Селезенское месторождение	36,98	10,8	0,12	14,50	2,03	1,25	–	0,11	0,53	–	–	–	–

(52 – 55 %) содержание марганца, но и высокая концентрация фосфора, поэтому эти руды не могут быть использованы для выплавки стандартных сплавов без предварительного обогащения.

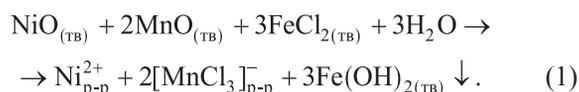
К полиметаллическому марганецсодержащему сырью относятся также железомарганцевые конкреции (ЖМК) Финского залива Балтийского моря и Тихого океана.

Содержание наиболее ценных компонентов в конкрециях находится в следующих пределах: 7,90 – 49,90 % Mn; 0,20 – 0,41 % Co; 0,16 – 2,00 % Ni; 0,03 – 1,60 % Cu; 15,00 – 25,00 % Fe.

Выбор технологической схемы переработки конкреций определяется их физико-химическими свойствами: формой присутствия составляющих конкреции элементов, их качественным составом, экономикой применяемых способов и конъюнктурой.

Наряду с рудами участков Сугул и Чумай обогащению подвергались конкреции следующего состава: 15,170 % Mn<sub>общ</sub>; 21,20 % MnO<sub>2</sub>; 0,275 % Co; 0,460 % Ni; 0,220 % Cu; 16,20 % Fe<sub>общ</sub>; 13,740 % SiO<sub>2</sub>; 2,60 % CaO; 2,010 % MgO; 3,670 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,255 % P; 16,680 % влаги.

Термодинамические расчеты и экспериментальные исследования по обогащению полиметаллического марганецсодержащего сырья позволили определить основные технологические параметры извлечения ценных компонентов с использованием в качестве растворителей водных растворов хлоридов кальция и железа, либо хлорида кальция и сульфата железа, а также предложить схему его обогащения (рис. 1) [3]. Наиболее перспективным растворителем при выщелачивании марганца и других ценных компонентов из полиметаллических марганецсодержащих руд является водный раствор хлорида железа FeCl<sub>2</sub>. При совместном выщелачивании оксидов никеля (NiO) и марганца (MnO) водным раствором хлористого железа из полиметаллических марганецсодержащих руд существенное влияние на растворение оксидов никеля и марганца оказывает образование в растворе комплексных соединений, что является особенностью поведения переходных 3d-элементов:



Образование по реакции (1) комплексных солей Ni[MnCl<sub>3</sub>]<sub>2</sub> с донорно-акцепторными химическими связями в водном растворе хлористого железа способствует более глубокому извлечению никеля (98 – 99 %) и марганца (95 – 97 %).

Высокое извлечение оксидов марганца и никеля из полиметаллических руд достигается при температуре процесса выщелачивания 475 – 500 К. Такие значения температур также способствуют очистке раствора от избыточного количества хлористого железа, которое при этих температурах гидролизует, выпадая в осадок.

Применение оптимальных технологических параметров обогащения позволяет извлекать из сырья до 95 – 97 % Mn, 98 – 99 % Ni, 60 % Co.

Наряду с марганцем и никелем в раствор переходят и другие присутствующие в рудном сырье элементы, в частности, железо и кобальт. Экспериментальными исследованиями были определены оптимальные условия селективного осаждения этих элементов (рис. 1). Это позволило получать из полиметаллического сырья следующие концентраты: марганцевый (~ 60 % Mn); никелевый (~ 46 % Ni); железный (~ 60 % Fe); кобальтовый (~ 33 % Co).

Марганцевый концентрат, полученный в результате обогащения, содержит 59 – 62 % Mn; 0,1 – 0,3 % SiO<sub>2</sub>; 0,1 – 0,2 % Fe; 0,01 % P; следы S. Извлечение марганца из полиметаллических марганецсодержащих руд в концентрат составляет не менее 90 %. Марганцевый концентрат целесообразно использовать для выплавки качественных сталей с низким содержанием фосфора и марганца металлического.

Сложность использования полученного концентрата для внепечного процесса выплавки марганца металлического алюминотермическим способом заключается в том, что тепла, выделившегося в ходе реакции восстановления, недостаточно для обеспечения эффективного разделения металла и шлака.

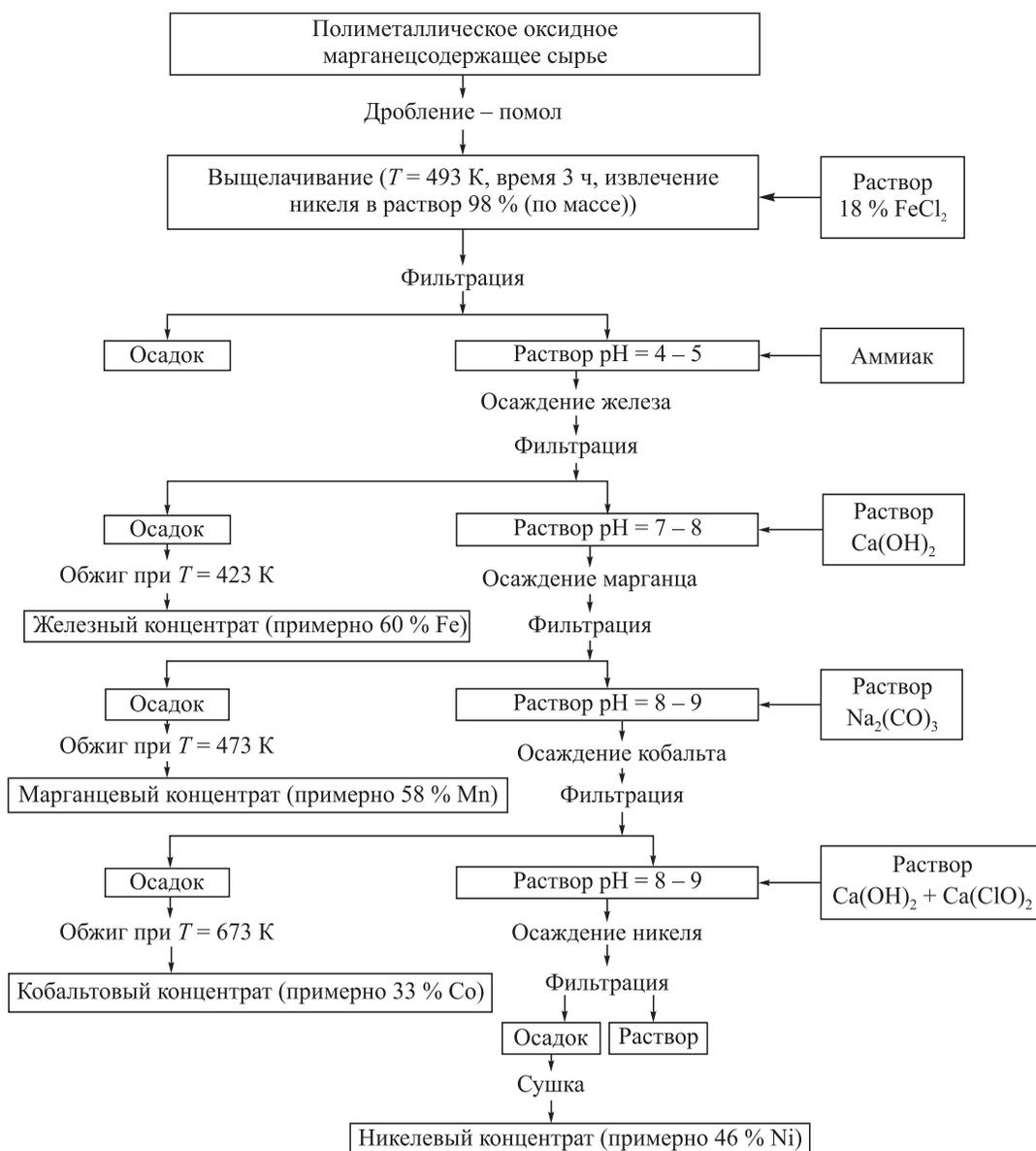
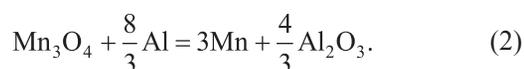


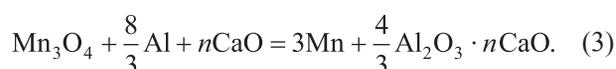
Рис. 1. Технологическая схема комплексного обогащения оксидного полиметаллического марганецсодержащего сырья

Fig. 1. Flow diagram of complex processing of oxide polymetallic manganese-containing ore

Это связано с тем, что марганец в концентрате химического обогащения по данным рентгенофазового анализа представлен в виде соединения  $Mn_3O_4$ . Аллюминотермический процесс восстановления  $Mn_3O_4$  можно описать следующей реакцией:



Для получения жидкоподвижного шлака и снижения его температуры плавления в шихту необходимо вводить флюс. В качестве флюса целесообразно использовать известь, тогда в общем виде процесс можно представить реакцией



Тепловые расчеты показали, что удельный тепловой эффект не превышает 1900 кДж/кг шихты.

Для повышения термичности процесса необходимо либо подводить тепло, используя электропечной агрегат или предварительный подогрев шихты, либо вводить в шихту высшие оксиды марганца  $Mn_2O_3$  и  $MnO_2$ .

Получить более высокую окисленность марганца возможно при получении марокита  $CaMn_2O_4$  и монофазного материала  $CaMnO_3$  [4, 5].

Однако при внепечной плавке для обеспечения тепловых условий процесса целесообразно использовать соединение  $CaMnO_3$ , в котором марганец имеет высшую окисленность. Проведенные исследования позволили определить следующие технологические параметры получения монофазного синтетического материала

$\text{CaMnO}_3$ : температура 1073 К, время синтеза 6 ч, соотношение концентрата химического обогащения и извести 2:1. Термохимическим синтезом был получен материал, рентгенофазовый состав которого представлен ниже:

- *известь*:  $\text{CaO}$  – много, портланд  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – присутствует, кальцит  $\text{CaCO}_3$ ;
- *концентрат химического обогащения*: гаусманит  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  – много;
- *синтезированный материал*:  $\text{CaMnO}_3$  – много; присутствует немного марокита  $\text{CaMn}_2\text{O}_4$ .

Восстановление марганца алюминием из синтезированного материала сопровождается значительным выделением тепла и представлено реакцией



Полученный  $\text{Al}_2\text{O}_3$  взаимодействует с монооксидом кальция с образованием легкоплавкого алюмината. Следовательно, в ходе восстановления потери марганца теоретически могут быть сведены к минимальным.

Синтезированный материал использовали при выплавке марганца металлического. Шихта состояла из концентрата химического обогащения, продуктов синтеза и алюминиевого порошка. Плавки вели в горне с верхним запалом. В результате был получен металл со средним содержанием марганца 97 %, что соответствует марке Мн 965, сплав отличается низким содержанием вредных примесей (фосфора и серы), а содержание железа не превышает 1 %. Извлечение марганца составило 90 % при полезном использовании алюминия 94 – 96 %.

Эффективным также является использование высококачественного марганцевого концентрата для обработки стали в ковше или агрегате ковш-печь.

В результате исследований установлено, что металлотермическое восстановление оксидов марганца значительно ускоряется при использовании марокита  $(\text{Ca}, \text{Mg})\text{Mn}_2\text{O}_4$  и манганитов кальция и магния  $(\text{Ca}, \text{Mg})\text{MnO}_3$ , которые могут быть получены из концентрата химического обогащения.

Проведенный комплекс исследований позволил определить технологические параметры синтеза марокита из высококачественного марганцевого концентрата.

Применение марокита в смесях для обработки стали на агрегате ковш-печь показало, что сквозное извлечение марганца составляет 87,90 – 94,27 %, что делает процесс практически безотходным и позволяет выплавлять стали чистые по фосфору.

Полученный при обогащении полиметаллического марганецсодержащего сырья никелевый концентрат (со средним содержанием никеля 46 %) может быть использован для прямого легирования стали.

Процесс восстановления никеля из оксида исследовали с использованием программного комплекса «Тер-

ра» [7] в системах  $\text{Ni-O-C}$  и  $\text{Ni-O-C-Fe}$ , представленным набором веществ  $l/\text{NiO}-nC$  и  $l/\text{NiO}-nC-m\text{Fe}_2\text{O}_3$ , где  $l, n$  и  $m$  – количество молей  $\text{NiO}$ ,  $\text{C}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  соответственно. Исходный состав системы формировали заданием значений  $l, n$  и  $m$ .

Методика исследования включала следующие этапы:

- расчет возможных составов и определение термодинамических условий, необходимых для осуществления процесса восстановления никеля;
- определение границ концентрационных областей протекания восстановительных процессов;
- нахождение параметров входного потока, при которых обеспечивается достижение оптимального состава системы в равновесных условиях.

Моделирование возможных составов, которые могут получаться в результате протекания процессов восстановления никеля в термодинамических системах ( $\text{Ni-O-C}$  и  $\text{Ni-O-C-Fe}$ ), осуществляли изменением количества углерода в них, что позволило оценить границы концентрационных областей протекания восстановительных процессов. Модельные системы  $\text{Ni-O-C}$  и  $\text{Ni-O-C-Fe}$  формировали путем задания исходного состава смеси в виде 1 моля монооксида никеля и оксида железа (III) и  $n$  молей углерода (рис. 2).

Термодинамические расчеты для системы  $\text{Ni-O-nC}$ , проводимые при температурах 1073, 1573 и 1873 К, показали, что максимальное восстановление 1 моля оксида никеля при температуре 1073 К достигается при расходе 0,5 моля углерода, а при температурах 1573 и 1873 К – при расходе 0,2 моля углерода на 1 моль монооксида никеля.

Полное восстановление никеля из оксида в системе  $\text{Ni-O-C-Fe}$  при температуре 1873 К происходит при содержании углерода в количестве 0,5 моля. При дальнейшем увеличении содержания углерода в системе одновременно с восстановлением никеля из его оксида начинается восстановление железа.

Результаты термодинамического моделирования показали, что никель из оксида можно полностью восста-

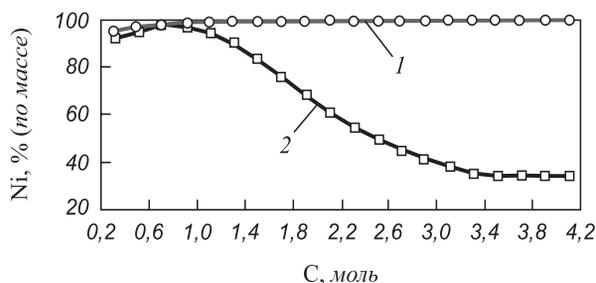


Рис. 2. Зависимость содержания никеля в металле от количества углерода в системах  $\text{Ni-O-nC}$  при температурах 1073 К (1) и 1873 К (2)

Fig. 2. Dependence of nickel content in metal on carbon quantity in the following  $\text{Ni-O-nC}$  systems under the temperature of 1073 K (1) and of 1873 K (2)

новить при температуре 1073 К в системе Ni–O–C и при 1873 К в системе Ni–O–C–Fe.

Изучение кинетики восстановления никеля из полученного никелевого концентрата проводили методом непрерывного взвешивания. Для этого были изготовлены брикеты, в состав которых входили никелевый концентрат и кокс ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» в соотношении 7:1. Результаты экспериментов показали, что при температурах 1273 и 1473 К никель из монооксида восстанавливается практически полностью в течение 20–30 мин, что также подтверждено результатами рентгенофазового анализа (рис. 3).

Для определения технологических параметров процесса легирования стали никелем было проведено шесть серий экспериментальных плавок стали в лабо-

раторной дуговой печи по двухшлаковой технологии с использованием двух видов брикетов: из никелевого концентрата и его смеси с коксом фракцией менее 0,125 мм. В качестве связующего использовали жидкое стекло. Брикетки вводили в завалку.

В результате проведенных исследований было установлено, что восстановление никеля практически завершается в период плавления. Извлечение никеля при использовании брикетов из смеси никелевого концентрата и кокса (серии 1, 2, 3) составляет 97–98 %, а при использовании брикетов, состоящих только из никелевого концентрата (серии 4, 5, 6), извлечение никеля на уровне 93–95 % (табл. 2). Сквозное извлечение никеля из рудного сырья составило около 90 %.

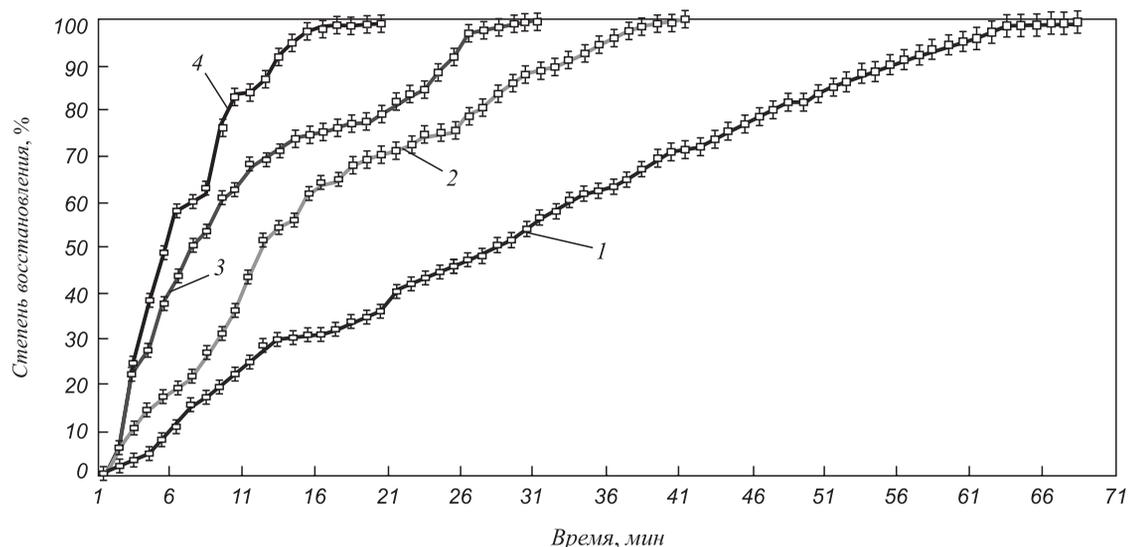


Рис. 3. Зависимость степени восстановления никеля из оксида от длительности изотермической выдержки при температурах 1073 К (1), 1173 К (2), 1273 К (3) и 1473 К (4)

Fig. 3. Dependence of the degree of nickel recovery from oxide on duration of isothermal soaking under the temperature of 1073 K (1), 1173 K (2), 1273 K (3) and 1473 K (4)

Таблица 2

Результаты легирования стали никелем

Table 2. Results of nickel alloying of steel

Показатель	Значения показателя по сериям плавок					
	1	2	3	4	5	6
Содержание Ni, %:						
в стальном ломе	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
в конце плавления	2,91	2,94	2,93	2,85	2,79	2,83
в готовом металле	2,91	2,94	2,93	2,85	2,79	2,83
в шлаке в конце плавления	0,084	0,057	0,063	0,144	0,207	0,165
Масса слитка, кг	9,98	9,97	9,95	9,96	9,97	9,95
Извлечение Ni, % (по массе)	97,2	98,1	97,9	95,2	93,1	94,5

Примечание. Состав стального лома: 0,275 % C; 0,267 % Si; 0,423 % Mn; 0,175 % Cr; 0,027 % S; 0,028 % P.

По предварительной оценке замена металлического никеля никелевым концентратом, полученным при гидрометаллургическом обогащении полиметаллических марганцевых руд, позволит значительно сократить затраты на легирующий элемент.

Железный концентрат (среднее содержание железа примерно 60 %), полученный при обогащении полиметаллического марганецсодержащего сырья (извлечение железа 96 – 98 %), использовали для получения металлизированного железа методом твердофазного восстановления [8, 9]. В качестве восстановителя использовали угли Кузбасского бассейна, технический состав которых приведен ниже:

Восстановитель	[C] в рабочей массе, %	$A^d$ , %	$V^{daf}$ , %	$W^r$ , %
Уголь бурый марки 2Б	49,10	7,83	46,76	35,3
Уголь длиннопламенный марки Д	55,60	5,64	43,53	15,4
Уголь слабоспекающийся марки СС	70,02	6,40	34,30	6,4
Коксовый орешек	84,56	9,41	1,83	3,0

Высокотемпературные эксперименты проводили в печи сопротивления с графитовым нагревателем и лабораторной дуговой сталеплавильной печи. Из используемых материалов были составлены смеси разного состава, которые в дальнейшем подвергли грануляции и восстановительному обжигу.

Изучены процессы восстановления железа из оксидов железных руд при температурах (1073, 1173, 1273, 1373 и 1473 К) восстановительного обжига. По результатам исследований было определено влияние физико-химических свойств углей различных технологических марок на процессы твердофазного восстановления железа из оксидов железных руд, определены основные технологические параметры металлизации, позволяющие получать металлизированные продукты с губчатой структурой с содержанием до 83 % металлического

железа и металлические гранулы с содержанием более 98 % металлического железа.

Металлизированные материалы были использованы для выплавки стали в лабораторной дуговой электропечи по двухшлаковой технологии. Выплавляли сталь марки Ст3 по ГОСТ 380 – 88. Количество металлизированного железа в металлошихте составляло 30 – 50 %. Результаты анализа химического состава выплавленной стали представлены в табл. 3, из которых следует, что при использовании в шихте металлизированных материалов возможно получать сталь с низким (менее 0,02 %) содержанием фосфора.

**Выводы.** На основе проведенных исследований предложена схема комплексной переработки полиметаллического сырья, включающая автоклавное выщелачивание полиметаллических марганецсодержащих руд растворами хлоридов и селективное осаждение из растворов ценных компонентов. Извлечение марганца из рудного сырья составило 95 – 97 %, никеля – 98 – 99 %, железа – 96 – 98 %. Использование продуктов обогащения позволило выплавлять марганец металлический марки Мн 965 (извлечение марганца составило 97 %); снизить себестоимость стали, содержащей никель, за счет обработки ее полученным никелевым концентратом; уменьшить содержание вредных примесей в стали при частичной замене металлошихты металлизированным железом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полулях Л.А., Дашевский В.Я., Юсфин Ю.С. Производство марганцевых ферросплавов из отечественных марганцевых руд // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 9. С. 5 – 12.
2. Чернобровин В.П., Мизин В.Г., Сирина Т.П., Дашевский В.Я. Комплексная переработка карбонатного марганцевого сырья: химия и технология. – Челябинск: изд. ЮУрГУ, 2009. – 294 с.
3. Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Кичигина О.Ю., Горюшкина Ю.В., Родзевич А.П. Исследование процесса извлечения марганца и никеля из полиметаллического марганецсодержащего сырья при его выщелачивании хлоридными растворами // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 12. С. 11 – 14.
4. Гасик М.И. Марганец. – М.: Металлургия, 1992. – 608 с.

Т а б л и ц а 3

#### Химический состав стали

Table 3. Chemical composition of steel

Соотношение металлизированный материал : лом	Номер плавки	Содержание, %, в металле элементов				
		C	Si	Mn	P	S
3:7	1	0,22	0,34	0,4	0,014	менее 0,05
	2	0,20	0,32	0,4	0,015	
	3	0,21	0,36	0,36	0,016	
1:1	4	0,22	0,36	0,4	0,006	
	5	0,21	0,36	0,38	0,006	
	6	0,26	0,37	0,4	0,004	

П р и м е ч а н и е. Состав стального лома: 0,275 % C; 0,267 % Si; 0,423 % Mn; 0,175 % Cr; 0,027 % S; 0,028 % P

5. Лященко В.С. Термические превращения минералов марганца осадочных месторождений: автореф. канд. геол.-минералог. наук. – Львов, 1987. – 22 с.
6. Рожихина И.Д., Нохрина О.И., Тираков Г.М., Борщевская Г.Л. Исследование процесса синтеза кальциймарганецсодержащих материалов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2008. № 10. С. 27–31.
7. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов. / Г.Б. Синярев, Н.А. Ватолин, Б.Г. Трусов, Г.К. Моисеев. – М.: Наука, 1982. – 264 с.
8. Юсфин Ю.С., Гиммельфарб А.А., Пашков Н.Ф. Новые процессы получения металла. Металлургия железа. – М.: Металлургия, 1994. – 320 с.
9. Амдур А.М., Потапов А.М., Разницына А.Л., Лхамсурен М. Кинетика восстановления железорудного концентрата углем // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 8. С. 17–20.

Поступила 4 февраля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. VOL. 58. No. 5, pp. 309–315.

## POLYMETALLIC MANGANESE ORE DRESSING AND OPTIMAL USE OF THE OBTAINED CONCENTRATES

**Nokhrina O.I.**<sup>1</sup>, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of ferrous metallurgy (kafamsf@sibsiu.ru)*

**Rozhikhina I.D.**<sup>1</sup>, *Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of ferrous metallurgy*

**Proshunin I.E.**<sup>2</sup>, *Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Quality Administration*

**Khodosov I.E.**<sup>1</sup>, *Head of Laboratory of the Chair of ferrous metallurgy*

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

<sup>2</sup> **JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant”** (16, Kosmicheskoe route, Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654043, Russia)

**Abstract.** Manganese ores are detected in the Altai – Sayan metallogenetic zone, they can be referred to the polymetallic ores, but they cannot be used for standard alloys production without preliminary dressing as they have a high content of phosphorus and iron. Thermodynamic calculations and experimental investigations on polymetallic manganese raw material dressing have determined some basic technological parameters of recovering and technological diagram of dressing. Obtaining of high-quality concentrates of manganese, nickel, iron, cobalt is possible due to that technological diagram. The application of optimal technological parameters of dressing can retrieve up to 95 – 97 % of manganese, 98 – 99 % of nickel and 96 – 98 % of iron from polymetallic manganese-containing raw material. It has been demonstrated that manganese concentrate can be used for manganese smelting and for steels with low content of phosphorus, and that allows reducing import of manganese materials. The technology of steel alloying with the usage of the obtained nickel concentrate has been worked out; and when metallic nickel is substituted by nickel concentrate, the costs for alloying are reduced considerably. The technology of metalized iron obtaining by the method of solid-phase recovery and iron concentrate has been worked out, and it can allow decreasing harmful impurities in steel.

**Keywords:** polymetallic manganese ores, high-quality manganese concentrate, nickel concentrate, metalized product, dressing, metallic manganese, direct alloying, steel.

## REFERENCES

1. Polulyakh L.A., Dashevskii V.Ya., Yusfin Yu.S. Production of manganese ferroalloys from the domestic manganese ores. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2014, no. 9, pp. 5–12. (In Russ.).
2. Chernobrovin V.P., Mizin V.G., Sirina T.P., Dashevskii V.Ya. *Kompleksnaya pererabotka karbonatnogo margantsevogo syr'ya: khimiya i tekhnologiya* [Complex processing of carbonate manganese raw materials: chemistry and technology]. Chelyabinsk: YuUrGU, 2009. 294 p. (In Russ.).
3. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Kichigina O.Yu., Goryushkina Yu.V., Rodzevich A.P. Research of the extraction process of manganese and nickel from polymetallic manganese-containing raw material at its leaching with chloride solutions. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2012, no. 12, pp. 11–14. (In Russ.).
4. Gasik M.I. *Marganets* [Manganese]. Moscow: Metallurgiya, 1992. 608 p. (In Russ.).
5. Lyashchenko V.S. *Termicheskie prevrashcheniya mineralov margantsa osadochnykh mestorozhdenii: avtoref. kand. geol.-mineralog. nauk* [Thermal transformations of manganese minerals of sedimentary deposits: Cand. of Geologo-Mineralogical Sci. diss.]. Lviv, 1987. 22 p. (In Russ.).
6. Rozhikhina I.D., Nokhrina O.I., Tirakov G.M., Borshchevskaya G.L. Research of synthesis process of calcium-manganese-containing materials. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2008, no. 10, pp. 27–31. (In Russ.).
7. Sinyarev G.B., Vatoлин N.A., Trusov B.G., Moiseev G.K. *Primenenie EVM dlya termodinamicheskikh raschetov metallurgicheskikh protsessov* [Computer usage for thermodynamic calculations of metallurgical processes]. Moscow: Nauka, 1982. 264 p. (In Russ.).
8. Yusfin Yu.S., Gimmel'farb A.A., Pashkov N.F. *Novye protsessy polucheniya metalla. Metallurgiya zheleza* [New processes of metal production. Iron metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1994. 320 p. (In Russ.).
9. Amdur A.M., Potapov A.M., Raznitsyna A.L., Lkhamsuren M. Reduction kinetics of iron-ore concentrates with coal. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2012, no. 8, pp. 17–20. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was performed within the framework of the state task in the sphere of scientific work of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-309-315

Received February 4, 2015

УДК 666.782:536.7

## АНАЛИЗ ФАЗОВО-ХИМИЧЕСКИХ РАВНОВЕСИЙ В СИСТЕМЕ РАСПЛАВ (Fe–Si–C)–ШЛАК (CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>)–ГАЗ (O<sub>2</sub>–SiO–CO)

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

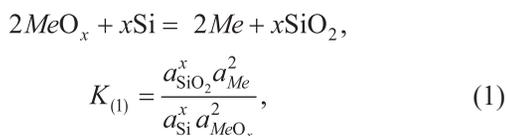
Сибирский государственный индустриальный университет  
(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Определены равновесные составы высококремнистых металлических расплавов, сосуществующих с шлаками системы CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>. Зависимости активностей  $a$  кремния в железокремниевых расплавах представлены в виде линий изоактивностей на диаграмме состояния Fe–Si. Рассчитаны равновесные с металлическим расплавом зависимости  $\lg P_{O_2} = f(x_{Si}, T)$  для температур 1823, 1873, 1973 К и влияние  $a_{SiO_2} = f(x_{Si}, T)$  на равновесный состав газовой фазы  $P_{O_2} = f(x_{Si}, T, a_{SiO_2})$ . Проанализированы и скорректированы данные по активностям диоксида кремния в шлаках системы CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>. Показано, что каждому сплаву заданного состава при фиксированной температуре соответствует только одно значение  $a_{SiO_2}$ , представленное на концентрационной диаграмме линией изоактивности. Установлено, что в присутствии углерода все высококремнистые сплавы могут быть получены при температурах  $T \geq 1973$  К при значениях  $a_{SiO_2} > 0,8$ ; при 1873 К и  $a_{SiO_2} > 0,9$  могут быть получены лишь сплавы с содержанием кремния менее 25 %, а при снижении  $a_{SiO_2}$  до 0,4 – менее 20 %. При более низких температурах ( $\leq 1823$  К) можно под кислым шлаком ( $a_{SiO_2} > 0,5$ ) получить лишь низкокремнистые сплавы (< 15 % Si).

**Ключевые слова:** кремнистый сплав, шлаковый расплав, активности, фазово-химические равновесия, углеродотермическое восстановление, треугольник концентраций.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-316-321

Исследование равновесий между металлическими и шлаковыми расплавами – одна из важнейших задач металлургии, точное решение которой зависит от многих трудно определяемых параметров. Применительно к кремнистым сплавам эту задачу пытаются решить при помощи описания равновесия реакции

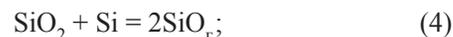
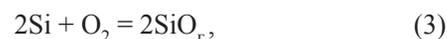


при этом необходимо иметь достаточно надежную информацию по пяти параметрам – температуре  $T$ , активностям  $a_{SiO_2} = f(x_{SiO_2}, T)$ ,  $a_{Me} = f(x_{Me}, T)$ ,  $a_{Si} = f(x_{Si}, T)$ ,  $a_{MeO} = f(x_{MeO}, T)$ . Такая информация для большинства высокотемпературных систем либо отсутствует, либо представлена данными, полученными различными экспериментальными и расчетными методами, которые при количественном сравнении часто отличаются кратко, что не позволяет делать достаточно корректные расчеты при оценке параметров реальных технологических процессов, в том числе равновесных составов сосуществующих металлических и шлаковых расплавов.

Равновесие кремнистых сплавов с шлаками и газовой фазой описывается реакцией



и сопутствующими реакциями



а в присутствии углерода также реакциями



Для реакции (2) имеем  $K_2 = \frac{a_{SiO_2}}{a_{Si} P_{O_2}}$ ,  $K_2 = \frac{49433}{T} - 10,33$ .

Для полной характеристики равновесного состояния необходимо знать следующие параметры:  $T$ ,  $a_{Si} = f(x_{Si}; a_{SiO_2} = f(x_{SiO_2}))$  и  $P_{O_2}$ . Применительно к получению железокремниевых сплавов нижний температурный предел ограничивается областями существования гомогенных металлических и шлаковых расплавов (~1700 К), верхний, как правило, не превышает 2000 К, выше ко-

торого интенсивно протекают сопутствующие реакции (3), (4).

Активность кремния  $a_{Si} = f(x_{Si}, T)$  в расплавах Fe–Si и Fe–Si–C изучалась многократно [1–4]. Во всех работах отмечается отрицательное отклонение от закона Рауля для всех исследованных интервалов концентраций ( $x_{Si} = 0 \div 1$ ) и температур (1700 ÷ 1973 К) и тем более сильное, чем меньше концентрация кремния в сплаве (при  $x_{Si} < 0,1$   $\lg \gamma_{Si} = 1 \cdot 10^{-2,7}_{1700} \div 1 \cdot 10^{-2,3}_{1973}$ ) [1]. Однако количественные результаты исследований отличаются значительно (рис. 1), в связи с чем с целью получения корректных данных, пригодных для расчетов равновесных состояний, активности кремния в сплавах при температурах 1773, 1873 и 1973 К сопоставлены с диаграммой состояния системы Fe–Si (рис. 2). Полученные зависимости, представленные как линии изоактивности кремния, достаточно достоверно отображают картину изменения активности кремния. Активность кремния для сплава данного состава, особенно для сплавов с высоким содержанием кремния ( $Si > 30\%$  (по массе)), мало зависит от температуры, что позволяет экстраполировать полученные зависимости как в область более высоких, так и в область более низких температур. Так, например, показано, что при 1600 К (изотерма ABCDE на рис. 2) активность кремния в области изменения концентраций кремния от 70 до 44 % (по массе) уменьшается от 1,00 до 0,48 (участок AB на рис. 1); на участке BC (смесь Ж + FeSi<sub>ТВ</sub>) – жидкий расплав с

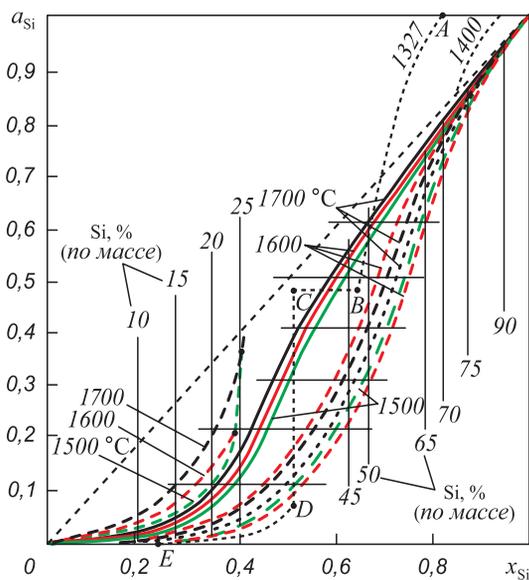
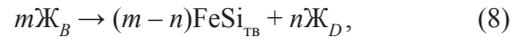


Рис. 1. Зависимость активности кремния от состава сплава и температуры. Сплавы Fe–Si–C: — — — — 1700 °С; - - - - 1600 °С; - - - - 1500 °С; сплавы Fe–Si: — — — — 1700 °С; - - - - 1600 °С; - - - - 1500 °С

Fig. 1. Dependence of the silicon activity on the alloy composition and temperature. The Fe–Si–C alloys: — — — — 1700 °C, - - - - 1600 °C, - - - - 1500 °C; the Fe–Si alloys: — — — — 1700 °C, - - - - 1600 °C, - - - - 1500 °C

твердыми кристаллами моносилицида FeSi, при этом активность кремния в жидком расплаве не изменяется ( $a_{Si} = 0,5 = \text{const}$ ); при составе смеси, соответствующей точке C, протекает химическая реакция



при этом активность кремния в жидком расплаве изменяется от 0,5 до 0,05 (участок CD на рис. 1); на участке DE в области гомогенных расплавов активность кремния уменьшается от 0,05 до практически нулевых значений.

В расплавах Fe–Si–C, насыщенных углеродом, активность кремния для сплавов заданного состава выше, чем для расплавов Fe–Si. Рассчитанные в соответствии с константой равновесия реакции (2) в сплавах с содержанием кремния более 45 % (по массе) значения  $\lg P_{O_2}$  (при  $a_{SiO_2} = 1$ ) мало зависят от состава расплава (рис. 2), незначительное уменьшение наблюдается лишь в низкокремнистых сплавах  $Si < 30\%$  (по массе).

Для сплавов, выплавляемых в соответствии с государственными и международными стандартами, содержащих 10 – 90 % (по массе) Si, табулированные значения  $a_{Si} = f(x_{Si}, T)$ , принятые для расчетов равновесных состояний, представлены в таблице. Влияние  $a_{SiO_2}$  на

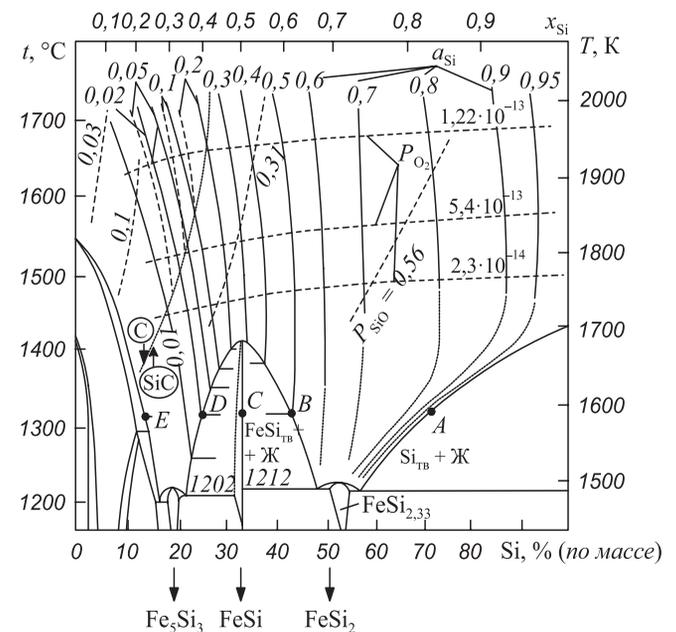


Рис. 2. Связь термодинамических параметров железокремниевых расплавов  $\Pi = f(x_{Si}, T)$  с диаграммой состояния системы Fe–Si: — — — —  $a_{Si} = f(x_{Si}, T)$  в расплавах Fe–Si; - - - -  $a_{Si} = f(x_{Si}, T)$  в расплавах Fe–Si–C<sub>нас</sub>; - - - -  $P_{O_2} = \text{const} = f(x_{Si}, T)$ ; - - - -  $P_{SiO} = \text{const} = f(x_{Si}, T)$ ; ..... линия выделения карбида кремния из расплавов, насыщенных углеродом

Fig. 2. The link of thermodynamic parameters of iron-silicon melts  $\Pi = f(x_{Si}, T)$  with the state diagram of the Fe–Si system: — — — —  $a_{Si} = f(x_{Si}, T)$  in Fe–Si melts; - - - -  $a_{Si} = f(x_{Si}, T)$  in Fe–Si–C<sub>нас</sub> melts; - - - -  $P_{O_2} = \text{const} = f(x_{Si}, T)$ ; - - - -  $P_{SiO} = \text{const} = f(x_{Si}, T)$ ; ..... the line of extracting of silicon carbide from melts saturated with carbon

**Физико-химические параметры равновесий в расплавах системы [Si] Fe – (SiO<sub>2</sub>)**

**Physico-chemical parameters of equilibrium in the alloys of the [Si] Fe – (SiO<sub>2</sub>) system**

Si, % (по массе)	$x_{Si}$	Значение параметров					
		$a_{[Si]}$ при $T, K$			$\lg P_{O_2} (a_{Si} = 1)$ при $T, K$		
		1823	1873	1973	1823	1873	1973
10	0,16	0,004	0,008	0,014	14,50	14,00	12,90
15	0,25	0,012	0,020	0,049	15,05	14,60	13,10
20	0,31	0,025	0,050	0,100	15,47	14,80	13,30
25	0,40	0,100	0,130	0,200	15,88	15,25	13,80
45	0,63	0,520	0,530	0,560	16,55	15,85	14,48
50	0,68	0,605	0,610	0,620	16,6	15,90	14,55
65	0,79	0,630	0,640	0,750	16,65	16,00	14,60
70	0,83	0,770	0,780	0,800	16,70	16,05	14,63
75	0,86	0,805	0,810	0,820	16,75	16,10	14,67
90	0,94	0,920	0,925	0,930	16,80	16,15	14,72

равновесные значения  $\lg P_{O_2} = f(x_{Si}, x_{SiO_2}, T)$  показано на рис. 3 для температур 1823, 1873, 1973 К в виде линий изоактивностей  $a_{SiO_2}$ . Для сплавов промышленного состава значения  $a_{SiO_2}$  приведены в таблице.

При заданной температуре ( $T = \text{const}$ ) каждому заданному значению  $a_{Si} = f(x_{Si}, T)$  соответствует постоянное строго фиксированное значение  $a_{SiO_2} = f(x_{SiO_2}, T)$  и  $\lg P_{O_2} = f(x_{Si}, T)$ . Для конкретных шлаковых расплавов, например для шлаков системы CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub>, при  $T = \text{const}$  параметры  $a_{SiO_2}$ ,  $a_{Si}$  ( $x_{[Si]}$  или % Si),  $\lg P_{O_2}$  могут быть представлены на диаграмме состояния системы CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> (рис. 4, а, б, в) в виде линий изоак-

тивностей  $a_{SiO_2}$  и соответствующих им значений равновесных концентраций кремния в сплаве (Si, %) или значений  $a_{Si}$ .

Точность расчетов зависит от точности определения значений  $a_{SiO_2}$ . Этой проблеме уделялось ранее и в настоящее время большое внимание. Наиболее часто используются данные работ [5–7]. Новые экспериментальные исследования [2–4] и модельные расчеты [8–10] подтверждают качественно сходимость полученных результатов с данными работ [5, 6], однако вряд ли могут претендовать на более высокую точность и достоверность. Поэтому при выборе значений  $a_{SiO_2}$  (по-

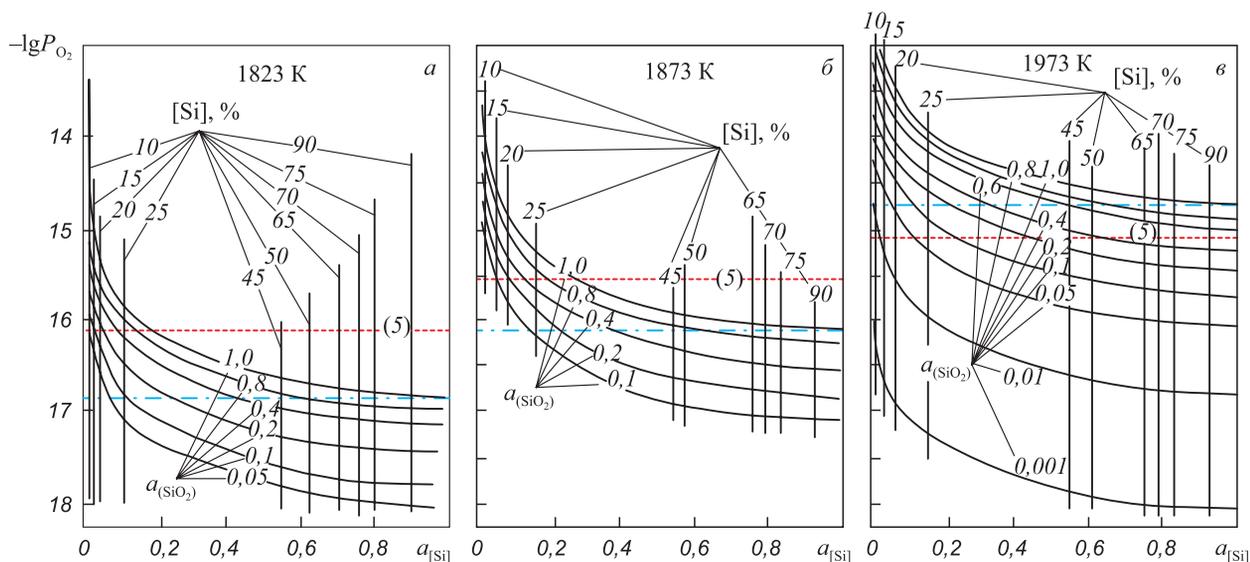


Рис. 3. Влияние состава, температуры и параметра  $a_{SiO_2}$  на равновесные значения  $P_{O_2}$  при температурах 1823 К (а), 1873 К (б) и 1973 К (в): —  $-\lg P_{O_2} = f(T, a_{Si}, a_{SiO_2})$ , цифры у кривых – значения  $a_{SiO_2}$ ; - - - значения  $-\lg P_{O_2} = \text{const} = K_{(1)T}$ ; - - - значения  $-\lg P_{O_2} = \text{const}(T)$  для реакции  $2C + O_2 = 2CO(5)$

Fig. 3. The influence of composition, temperature and  $a_{SiO_2}$  on the equilibrium values of  $P_{O_2}$  at temperatures of 1823 (a), 1873 (b) and 1973 (c) K: —  $-\lg P_{O_2} = f(T, a_{Si}, a_{SiO_2})$ , numbers near curves – values  $a_{SiO_2}$ ; - - - values  $-\lg P_{O_2} = \text{const} = K_{(1)T}$ ; - - - values  $-\lg P_{O_2} = \text{const}(T)$  for the reaction of  $2C + O_2 = 2CO(5)$

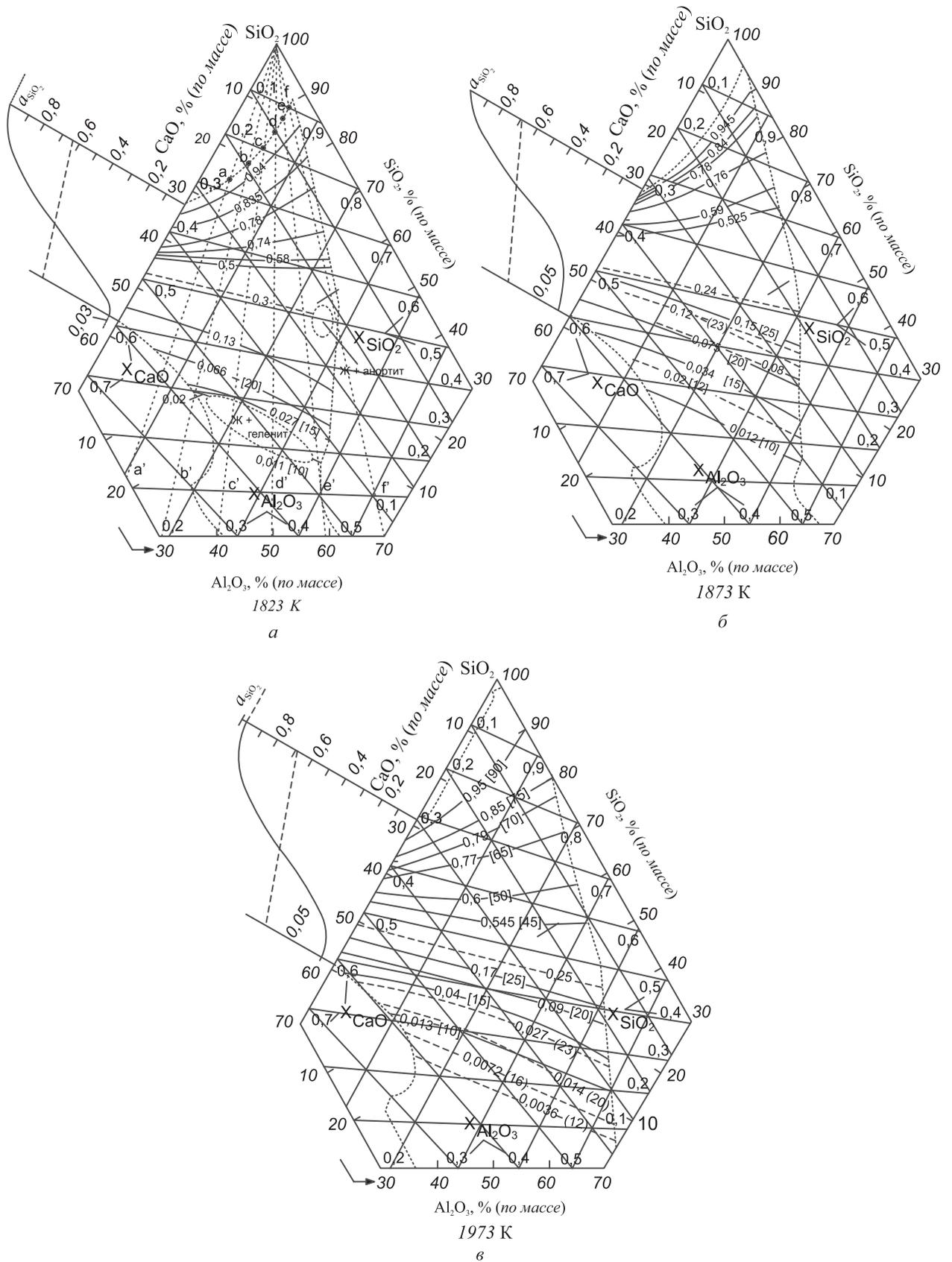


Рис. 4. Активности диоксида кремния в гомогенных шлаковых расплавах CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> при 1823 К (а), 1873 К (б) и 1973 К (в). Цифры у кривых – значения  $a_{\text{SiO}_2}$ ; цифры в квадратных и круглых скобках – равновесные концентрации кремния в металлических расплавах соответственно по данным авторов и по данным работы [6]

Fig. 4. Activity of silicon dioxide in a homogeneous CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> slag melts at 1823 K (a), 1873K (б) and 1973 K (в). Numbers near curves – values  $a_{\text{SiO}_2}$ ; the numbers in brackets – are the equilibrium concentration of silicon in the metal melts

ложения линий изоактивностей в области гомогенных шлаковых расплавов системы  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ) для получения корректных результатов использованы следующие положения.

1. Линии изоактивности ( $a_{\text{SiO}_2}$  в расплавах системы  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ), исходящие со стороны двухкомпонентной системы  $\text{CaO}-\text{SiO}_2$  ( $x_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 0$ ) по своему значению должны соответствовать значениям  $a_{\text{SiO}_2}$  в системе  $\text{CaO}-\text{SiO}_2$  при заданном составе шлака и температуре.

2. Линии зависимости  $a_{\text{SiO}_2} = f(x_{\text{SiO}_2}$  или  $\text{SiO}_2, \%$  (по массе)), построенные для равных соотношений ((% по массе)  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 4,0; 2,33; 1,5; 1,0; 0,66; 0,43$ ), исходящие соответственно из точек  $a, b, c, d, e, f$  на изотерме насыщения расплава диоксидом кремния на поверхности ликвидуса при заданной температуре, пересекаются практически в одной точке. При температуре 1823 К точке пересечения соответствуют координаты  $a_{\text{SiO}_2} = 0,3, x_{\text{SiO}_2} = 0,48$ ; при 1873 К –  $a_{\text{SiO}_2} = 0,24, x_{\text{SiO}_2} = 0,52$ , при 1973 К –  $a_{\text{SiO}_2} = 0,25, x_{\text{SiO}_2} = 0,45$ . На треугольнике концентраций этим значениям соответствуют прямые линии с равными значениями  $a_{\text{SiO}_2}$ , разделяющие область гомогенного расплава на два поля: верхнее, где все линии изоактивностей, начинаясь от стороны двухкомпонентной системы  $\text{CaO}-\text{SiO}_2$ , направляются по мере увеличения в расплаве концентраций  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  вверх, и нижнее поле, где линии изоактивности закономерно опускаются вниз с выпуклой по отношению к линии равных активностей кривизной.

3. В случаях, когда при заданной температуре внутри области гомогенного расплава выделяется двухфазная область (например, при 1823 °С – жидкость + геленит, жидкость + анортит), линии изоактивности не могут огибать эту область, это можно предположить, считая что на всей изотерме, ограничивающей эту область, в равновесии с геленитом (или анортитом) находится жидкость постоянного состава. На самом деле состав расплава (в том числе и концентрация  $\text{SiO}_2$ ) изменяется и, соответственно,  $a_{\text{SiO}_2}$  также изменяется.

4. Линии изоактивности при пересечении с изотермой, ограничивающей гетерогенную область, не пересекают эту область. Изменение активностей компонентов в этой области происходит по схеме, представленной для сплавов Fe–Si при 1600 К, с резким изменением активностей компонентов при выделении из расплава кристаллов геленита (или анортита).

С учетом этих положений рассчитанные для промышленных сплавов значения  $a_{\text{SiO}_2}$  нанесены на поле гомогенных расплавов в виде линий изоактивностей, каждой из которых соответствует расплав строго заданного состава. Например, расплав, содержащий 75 % Si (ФС 75), должен находиться в равновесии только со шлаками составов, соответствующих линии изоактивности  $a_{\text{SiO}_2} = 0,85$ . При отклонении состава шлака от этой линии неизбежно должен изменяться состав ферросилиция, в том числе за счет реакций (2), (4). При концентрации кремния больше равновесной должны

протекать реакции силикотермического восстановления  $\text{CaO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ :



В присутствии углерода газовая фаза будет состоять, в основном, из монооксида углерода, содержание кислорода в газовой фазе при температурах 1773, 1823, 1873 и 1973 К и давлении  $P_{\text{общ}} = 1$  ат составит соответственно  $P_{\text{O}_2} = 1,71 \cdot 10^{-16}; 2,66 \cdot 10^{-16}; 4,04 \cdot 10^{-16}; 8,7 \cdot 10^{-16}$ , ( $-\lg P_{\text{O}_2} = 15,76; 15,57; 15,40; 15,06$ ) (рис. 3), следовательно при 1973 К углеродотермическим процессом могут быть получены все промышленные сплавы ( $P_{\text{O}_2} [\text{C}_{\text{тн}}] < P_{\text{O}_2} [\text{Si}]$ ) при значениях  $a_{\text{SiO}_2} \geq 0,85$ ; при 1873 К – сплавы с содержанием кремния менее 65 %, а при  $a_{\text{SiO}_2} > 0,4$  – сплавы с содержанием кремния менее 25 %; при  $a_{\text{SiO}_2} > 0,1$  – сплавы, содержащие менее 20 % Si.

При 1873 К ( $P_{\text{O}_2} [\text{C}_{\text{тн}}] = -16,7$ ) при значениях  $a_{\text{SiO}_2} \approx 1$  могут быть получены лишь сплавы с содержанием кремния менее 25 %, при  $a_{\text{SiO}_2} = 0,4$  – с содержанием примерно 20 % Si; при  $a_{\text{SiO}_2} = 0,2$  – 15 % Si; при  $a_{\text{SiO}_2} = 0,05$  – 10 % Si. При более низких температурах могут получаться углеродотермическим восстановлением лишь низкокремнистые сплавы ( $\text{Si} < 15 \%$ ) под кислым шлаком ( $a_{\text{SiO}_2} > 0,5$ ). Минимальный уровень температур, при которых могут быть получены сплавы ФС 45 и ФС 50, составляет примерно 1920 К.

Интенсификация процесса возможна за счет понижения концентрации кислорода в газовой фазе (вакуум, разбавление), либо за счет изменения состава шлака и смещения границы насыщения шлака диоксидом кремния в сторону более низких температур, изменения области гомогенности расплава при заданной температуре и положения линий изоактивностей, что возможно за счет введения в шлак компонентов как с явно выраженными кислотными свойствами (например  $\text{TiO}_2$ ), так и основными ( $\text{K}_2\text{O}, \text{Na}_2\text{O}, \text{BaO}$ ).

**Выводы.** Проанализированы данные по активности кремния в расплавах Fe–Si и Fe–Si–C. На диаграмме состояния системы Fe–Si в поле гомогенных расплавов представлены зависимости  $a_{\text{Si}} = f(x_{\text{Si}}, T)$  в интервале температур 1600 – 2000 К и концентраций кремния  $x_{\text{Si}} = 0,2 - 0,95$ , а также в расплавах Fe–Si–C, насыщенных углеродом, от  $x_{\text{Si}} = 0,05$  вплоть до линии выделения из расплава карбида кремния. Определены значения  $-\lg P_{\text{O}_2}$ , равновесные с расплавами заданного состава при температурах 1823, 1873 и 1973 К. Показано влияние активности диоксида кремния в шлаковом расплаве на изменение равновесных характеристик. Проанализированы литературные данные по исследованию активности диоксида кремния в шлаках системы  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ . Построены корректные зависимости  $a_{\text{SiO}_2} = (x_{\text{SiO}_2}, x_{\text{CaO}}, x_{\text{Al}_2\text{O}_3})$  в области гомогенных

расплавов на изотермических разрезах треугольника концентраций Гиббса при температурах 1823, 1873, 1973 К. Показано, что при 1973 К методом углеродотермического восстановления могут быть получены все промышленные сплавы при значениях  $a_{\text{SiO}_2} > 0,8$ ; а при 1873 К и  $a_{\text{SiO}_2} \approx 1$  могут быть получены сплавы, содержащие  $\leq 25\%$  Si; при более низких температурах могут получаться лишь низкокремнистые сплавы ( $< 20\%$  Si).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Эллиот Д.Ф., Глейзер М., Рамакришна В. Термохимия сталеплавильных процессов. – М.: Металлургия, 1969. – 252 с.
2. Зубов В.Л., Гасик М.И. Электрометаллургия ферросилиция. – Днепропетровск: Системные технологии, 2002. – 704 с.
3. Толстогузов Н.В. Теоретические основы и технология плавки кремнистых и марганцевых сплавов. – М.: Металлургия, 1992. – 239 с.

4. Якушевич Н.Ф., Галевский Г.В. Взаимодействие углерода с оксидами кальция, кремния, алюминия. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 1999. – 250 с.
5. Rein R.H. Activities in the Liquid Solution  $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3$  at 1600 °C // *Trans TMS-AJME*. 1965. Vol. 233. P. 415 – 425.
6. Kay D.A.R., Taylor J. Activities of Silica in the Lime + Aluminium + Silica System // *Trans Faraday Soc.* 1960. Vol. 56. P. 1372 – 1386.
7. Атлас шлаков: справочное издание. – М.: Металлургия, 1985. – 208 с.
8. Зайцев А.И., Могутнов Б.М., Шахназов Е.Х. Физическая химия металлургических шлаков. – М.: Интерконтакт Наука, 2008. – 352 с.
9. Hiroki O. Activities in  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$  slags and deoxidation equilibria of Si and Al // *Metallurgical and materials processing*. 1996. Vol. 27. P. 943 – 953.
10. Якушевич Н.Ф., Кондратьев Д.В. Термодинамика первичных шлаков в системе  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2000. № 2. С. 4 – 9.

Поступила 10 февраля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. VOL. 58. NO. 5, PP. 316–321.

### ANALYSIS OF PHASE AND CHEMICAL EQUILIBRIUM IN THE SYSTEM OF MELT (Fe–Si–C) – SLAG ( $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ) – GAS ( $\text{O}_2-\text{SiO}-\text{CO}$ )

*Yakushevich N.F., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Non-ferrous metallurgy and chemical engineering”*

*Polyakh O.A., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor the Chair “Non-ferrous metallurgy and chemical engineering”*

*Galevskii G.V., Dr. Sci. (Eng.), Head of the Chair “Non-ferrous metallurgy and chemical engineering”, Director of the Institute of Metallurgy and Materials*  
(kafcmet@sibsiu.ru)

*Tyazhina A.A., Postgraduate the Chair “Non-ferrous metallurgy and chemical engineering”*

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

**Abstract.** The equilibrium compositions of high-silicon metal melts, which coexist with the slag of the  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  system, have been determined. Dependences of the activity of silicon in iron-silicon melts have been represented as lines of isoactivities on the Fe–Si state diagram. Equilibrium with the metal melt relationships  $\lg P_{\text{O}_2} = f(x_{\text{Si}}, T)$  for temperatures of 1823, 1873, 1973 K and influence of  $a_{\text{SiO}_2} = f(x_{\text{Si}}, T)$  on the equilibrium composition of the gas phase ( $P_{\text{O}_2} = f(x_{\text{Si}}, T, a_{\text{SiO}_2})$ ) have been calculated. Data on the activity of silicon dioxide in the  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  slag system have been analyzed and corrected. It has been shown that each alloy of the given composition at a fixed temperature corresponds to only one value of  $a_{\text{SiO}_2}$ , which is represented on the concentration diagram of the lines of isoactivity. It has been established that in the presence of carbon all high-silicon alloys can be obtained at temperatures of  $T \geq 1973$  K at the values of  $a_{\text{SiO}_2} > 0,8$ ; at 1873 K and  $a_{\text{SiO}_2} > 0,9$  can be obtained only alloys with silicon content, which is less than 25 %, and the decrease of  $a_{\text{SiO}_2}$  up to 0.4 to less than 20 %. At lower temperatures ( $\leq 1823$  K) under acidic slag ( $a_{\text{SiO}_2} > 0,5$ ) only low-silicon alloys can be obtained ( $< 15\%$  Si).

**Keywords:** silicon alloys, molten slag, activity, phase and chemical equilibrium, carbothermal reduction, concentration triangle.

#### REFERENCES

1. Elliott John F., Gleiser Molly, Ramakrishna V. Thermochemistry for Steelmaking. Addison – Wesley Inc. 1963. (Russ.ed.: Elliott J., Gleiser M., Ramakrishna V. *Termokhimiya staleplavil'nykh protsessov*. Moscow: Metallurgiya, 1969. 252 p.)
2. Zubov V.L., Gasik M.I. *Elektrometallurgiya ferrosilitsiya* [Electrometallurgy of ferrosilicon]. Dnepropetrovsk: Sistemnye tekhnologii, 2002. 704 p.
3. Tolstoguzov N.V. *Teoreticheskie osnovy i tekhnologiya plavki kremnistykh i margantsevykh splavov* [Theoretical basis and the melting technology of silicon and manganese alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1992. 239 p. (In Russ.)
4. Yakushevich N.F., Galevskii G.V. *Vzaimodeistvie ugleroda s oksidami kal'tsiya, kremniya, alyuminiya* [Interaction of carbon with calcium oxide, silicon, aluminum]. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 1999. 250 p. (In Russ.)
5. Rein R.H. Activities in the Liquid Solution  $\text{SiO}_2-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$  at 1600 °C. *Trans TMS-AJME*. 1965. Vol. 233, pp. 415–425
6. Kay D.A.R., Taylor J. Activities of Silica in the Lime + Aluminium + Silica System. *Trans Faraday Soc.* 1960. Vol. 56, pp. 1372–1386.
7. *Schlackenatlas*. Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Verlag Stahleisen. 1981. 282 p. (Russ.ed.: *Atlas shlakov. Sprav.* Moscow: Metallurgiya, 1985. 208 p.)
8. Zaitsev A.I., Mogutnov B.M., Shakhnazov E.Kh. *Fizicheskaya khimiya metallurgicheskikh shlakov* [Physical chemistry of metallurgical slag]. Moscow: Interkontakt Nauka, 2008. 352 p. (In Russ.)
9. Hiroki O. Activities in  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$  slags and deoxidation equilibria of Si and Al. *Metallurgical and materials processing*. 1996. Vol. 27, pp. 943–953.
10. Yakushevich N.F., Kondrat'ev D.V. Thermodynamics of first slag in  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  system. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2000, no. 2, pp. 4–9. (In Russ.)

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-316-321

Received February 10, 2015

УДК 621.771.25

## ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА РЕСУРСΟΣБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА СОРТОВОГО ПРОКАТА НА ДЕЙСТВУЮЩИХ НЕПРЕРЫВНЫХ СТАНАХ

*Фастыковский Р.А., д.т.н., профессор кафедры обработки металлов давлением  
и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК*

*Уманский А.А., к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов (umanski@bk.ru)*

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

**Аннотация.** На основании результатов моделирования процессов прокатки в сортовых калибрах простой формы определены и экспериментально подтверждены закономерности течения поверхностных слоев заготовок и их влияние на формирование напряженно-деформированного состояния металла в процессе прокатки. С учетом сформулированных рекомендаций разработана и прошла опытно-промышленное опробование новая калибровка валков черновой группы клетей непрерывного мелкосортного стана 250-2 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», использование которой позволило увеличить выход годного при производстве проката из качественных конструкционных сталей на 3 %. Проведена оценка повышения эффективности производства за счет увеличения производительности при внедрении процесса прокатки-разделения в условиях действующего непрерывного мелкосортного стана 250-1 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК». Предложена методика для определения кратности разделения в зависимости от необходимого приращения производительности, приведены рекомендации по расчету скоростного режима в черновых и чистовых клетях непрерывных станов, фактические данные по изменению суммарных коэффициентов вытяжки и скоростных условий по группам клетей при получении арматурных профилей № 10, № 12 и № 14.

**Ключевые слова:** ресурсосберегающие технологии, сортовая прокатка, отходы, калибровка прокатных валков, прокатка-разделение.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-322-327

В настоящее время важными направлениями развития прокатного производства, в том числе сорто-прокатных станов, являются энерго- и ресурсосбережение, что связано с необходимостью обеспечения конкурентоспособности прокатной продукции на внешнем и внутреннем рынках за счет более низкой себестоимости производимой продукции. При этом в качестве основных направлений для реализации ресурсосберегающих режимов прокатки в условиях действующих станов являются снижение количества отходов и брака, уменьшение энергозатрат на производство.

Следует отметить, что значительную долю в структуре отходов составляет отбраковка из-за наличия поверхностных дефектов. Эти поверхностные дефекты на готовом прокате могут иметь как сталеплавильное происхождение (то есть переходить с исходных заготовок (слитков)), так и образовываться при нагреве заготовок под прокатку или непосредственно в процессе деформации в прокатных клетях.

Известно, что использование оптимальных режимов прокатки позволяет не только снизить вероятность образования поверхностных дефектов в процессе деформации, но и значительно уменьшить размеры дефектов, уже имеющихся на поверхности исходных заготовок (слитков). Процессы образования и развития поверхностных дефектов зависят от схемы напряженно-дефор-

мированного состояния металла в процессе прокатки, которая, в свою очередь, определяется используемой калибровкой прокатных валков.

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных разработке и совершенствованию калибровок прокатных валков для производства сортовых профилей [1 – 3], следует отметить отсутствие единого мнения по данному вопросу. Указанный факт связан с тем, что исследователями не установлены общие закономерности влияния течения различных слоев металла при прокатке в калиброванных валках на формирование напряженно-деформированного состояния металла в объеме раската.

Исследования в этом направлении до последнего времени были затруднены сложностью математического аппарата, необходимого для проведения моделирования. Появившиеся в последние годы специализированные программные комплексы (DEFORM, QFORM, ANSYS/LS-DYNA) позволяют решить указанную проблему. Так, авторами работы [4] проведено исследование напряженно-деформированного состояния в области расположения угловых дефектов на слябах и его взаимосвязи с формоизменением указанных дефектов в процессе прокатки, по результатам которого разработана эффективная схема прокатки в черновой группе клетей листопрокатного стана «2000». Следует отметить, что для калиброванных валков подобные исследования

на сегодняшний день отсутствуют, что делает исследование в этом направлении актуальными.

В настоящей работе с использованием программного комплекса DEFORM 3D проведено моделирование напряженно-деформированного состояния металла при прокатке заготовок различной формы в сортовых калибрах: деформация заготовки квадратного поперечного сечения в ящичном, ромбическом и овальном калибрах и деформация подката, имеющего поперечное сечение в форме овала, в калибре овальной формы.

В качестве показателя, характеризующего напряженно-деформированное состояние металла в процессе прокатки, использовали критерий Кокрофта-Лэтэма, определяемый по выражению

$$D = \int_0^{\bar{\varepsilon}} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon},$$

где  $\bar{\varepsilon}$  – накопленная пластическая деформация;  $d\bar{\varepsilon}$  – приращение накопленной деформации;  $\sigma^*$  – максимальное главное растягивающее напряжение;  $\bar{\sigma}$  – интенсивность напряжений.

Этот критерий характеризует степень исчерпания запаса пластичности и, таким образом, определяет вероятность образования и развития дефектов в процессе деформации.

С целью раскрытия механизмов создания напряженно-деформированного состояния металла при прокатке в калибрах разной формы моделировали течение металла в различных зонах по ширине калибров с помощью точек, нанесенных на верхнюю грань исходной заготовки.

В результате установлено, что степень использования запаса пластичности поверхностных слоев заготовки напрямую зависит от горизонтального перемещения металла: наибольшие значения критерий Кокрофта-Лэтэма принимает в тех зонах калибров, где перемещение в горизонтальном направлении полностью отсутствует (имеет место только вертикальное перемещение металла) (рис. 1). Такие зоны для исследуемых вытяжных сортовых калибров располагаются в приповерхностных слоях заготовки вокруг вертикальной оси калибров. В боковых зонах сортовых калибров поверхностные слои металла одновременно перемещаются в направлении обжатия и в горизонтальной плоскости по направлению от центра калибра к его периферии. Установлено, что наиболее благоприятная схема напряженно-деформированного состояния создается при высокой степени подобия формы исходной заготовки и используемых для прокатки калибров: минимальные значения критерия Кокрофта-Лэтэма получены при деформации подката овального поперечного сечения в овальном калибре, а максимальные – при деформации квадратной заготовки в калибре овальной формы.

Для подтверждения полученных данных проведена серия лабораторных и промышленных экспериментов [5, 6].

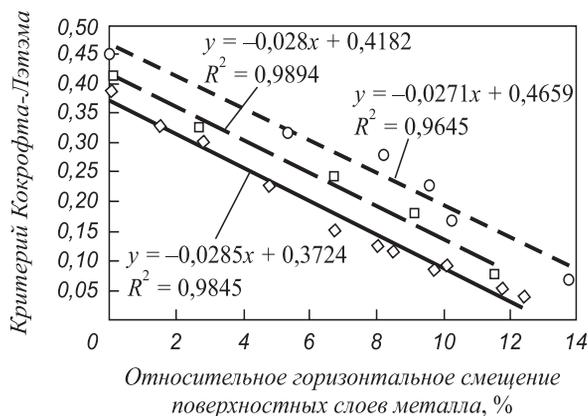


Рис. 1. Зависимость степени использования запаса пластичности при прокатке в сортовых калибрах от характера течения металла в процессе деформации:

—,  $\diamond$  – ромбический калибр; - - -,  $\square$  – ящичный калибр; - - -,  $\circ$  – овальный калибр

Fig. 1. Dependence of usage factor of plasticity reserve when rolling in bar passes on the pattern of metal flow in the deformation process:

—,  $\diamond$  – rhombic pass; - - -,  $\square$  – box pass; - - -,  $\circ$  – oval pass

Методика проведения экспериментальных исследований заключалась в нанесении на поверхность исходных заготовок (образцов) искусственных дефектов и анализе их выкатываемости при деформации в калибрах различной формы.

В качестве критерия интенсивности выкатываемости поверхностных дефектов использовали коэффициент выработки, определяемый по выражению

$$K_{\text{выр}} = \frac{H_{\text{д0}}}{H_{\text{д1}}},$$

где  $H_{\text{д0}}$  и  $H_{\text{д1}}$  – глубина дефектов до и после прокатки.

При проведении лабораторных исследований производили прокатку свинцовых образцов квадратного поперечного сечения в прямоугольном, ромбическом и овальном калибрах. Промышленные эксперименты проводили в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-2 ОАО «ЕВРАЗ объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (ЕВРАЗ ЗСМК) с использованием заготовок от плавок текущего производства. Заготовки прокатывали по двум калибровкам: существующей (базовой) с использованием ящичных и шестигранных калибров в последних клетях черновой группы и опытной, предполагающей замену калибров указанной формы на прокатку по схеме овал – ребровой овал.

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что выкатываемость поверхностных дефектов в процессе деформации в значительной степени зависит от их расположения (рис. 2): дефекты, нанесенные на грани заготовок, в процессе деформации выкатываются в среднем в 1,1 раза менее интенсивно, чем дефекты, расположенные на ребрах заготовок.

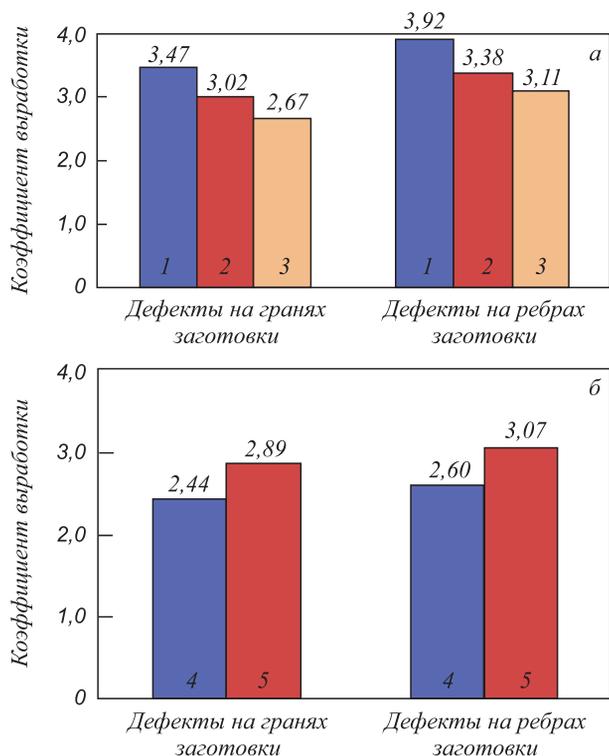


Рис. 2. Выкатываемость поверхностных дефектов при лабораторных (а) и промышленных (б) исследованиях: 1 – 3 – ромбический, ящичный и овальный калибр; 4 и 5 – базовая и опытная калибровка

Fig. 2. Rolling-off of surface defects at laboratory (a) and industrial (b) researches:

1 – 3 – rhombic, box and oval pass; 4 and 5 – basic and pilot calibration

При увеличении подобия формы калибра и исходной заготовки (подката) выкатываемость поверхностных дефектов повышается. По результатам лабораторных исследований наименьший коэффициент выработки зафиксирован при деформации квадратной заготовки в овальном калибре (рис. 2, а), промышленные исследования показали повышение выкатываемости поверхностных дефектов при переходе на схему овал – ребро-овал (рис. 2, б).

Таким образом, определенные при моделировании закономерности течения металла при прокатке в сортовых калибрах простой формы и их влияние на формирование напряженно-деформированного состояния металла в объеме раската подтверждены экспериментально.

На основании проведенных исследований с учетом сформулированных рекомендаций разработана и прошла опытно-промышленное опробование новая калибровка валков черновой группы клетей непрерывного мелкосортного стана 250-2 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», в которой прокатка по схеме ящичный калибр – шестигранник заменена на вытяжную систему овал – ребровой овал. По полученным данным использование новой калибровки валков позволило увеличить выход годного при производстве проката из качественных конструкционных сталей на 3 %.

Для реализации уменьшения энергозатрат при разработке ресурсосберегающих технологий производства сортового проката перспективной является технология прокатки-разделения, которая реализуется по двум схемам: 1 – формирование сочлененного профиля и продольное разделение в валках прокатного стана [7, 8]; 2 – формирование сочлененного профиля и продольное разделение в неприводных делительных устройствах [9, 10]. Опыт использования этих двух подходов в реализации технологии прокатки-разделения позволил выявить их достоинства и недостатки, анализ которых показал преимущества разделения с использованием неприводных устройств [11, 12]. Это, в свою очередь, вызывает повышенный интерес к такому способу обработки, однако внедрение технологии прокатки-разделения с использованием неприводного делительного инструмента в условиях действующего производства сопряжено с необходимостью индивидуального подхода к оценке пропускной способности и технических характеристик имеющегося оборудования. На начальном этапе следует, исходя из возможностей оборудования, определить количество полос, одновременно прокатываемых в чистовой клетке. Для этой цели по пропускной способности оборудования необходимо определить максимально возможное приращение производительности ( $\Delta\Pi$ ), найти кратность разделения и скорость прокатки в чистовой клетке, которые обеспечивают желаемое приращение производительности

$$\Delta\Pi = \frac{3600 MKk_{ii}}{k_p} (nV_{п-р} - V_k),$$

где  $M$  – масса погонного метра готового профиля;  $K$  – число групп чистовых клетей;  $n$  – число полос после продольного разделения;  $k_{ii}$  – коэффициент использования стана;  $k_p$  – расходный коэффициент металла;  $V_{п-р}$  – скорость прокатки в чистовой клетке при прокатке-разделении;  $V_k$  – скорость в чистовой клетке при классической прокатке.

Скорость в чистовой клетке при освоении прокатки-разделения с использованием неприводного делительного инструмента в зависимости от числа полос после разделения и приращения производительности можно определить следующим образом:

$$V_{п-р} = \frac{V_k}{n} \left( 1 + \frac{\Delta\Pi}{\Pi_k} \right),$$

где  $\Pi_k$  – производительность при классическом способе прокатки.

Одновременная прокатка двух полос в чистовой группе существенно изменяет силовые и скоростные условия: момент и усилие прокатки после продольного разделения увеличиваются, скорость уменьшается. Такие изменения требуют при определении скорости  $V_{п-р}$  соизмерять технически возможный нижний предел скорости прокатки с мощностью двигателей.

При реализации прокатки-разделения суммарное уменьшение площади поперечного сечения полосы в чистовых клетях увеличивается в зависимости от числа разделяемых полос, это приводит к перераспределению коэффициентов вытяжки между группами клетей в сторону уменьшения суммарных коэффициентов вытяжки в группах черновых и промежуточных клетей, а в некоторых случаях – к возможности исключения клетей промежуточной группы.

Уменьшение длины готового профиля при продольном разделении на  $n$  полос, перераспределение коэффициентов вытяжки между группами клетей приводят к необходимости увеличения скорости прокатки в черновой группе клетей. Скорость в последней клетке промежуточной группы ( $V_{\text{пром}}$ ) в зависимости от числа разделяемых полос можно определить по формуле

$$V_{\text{пром}} = \frac{V_{\text{п-р}}}{\mu_{\Sigma \text{чист}}} n,$$

где  $\mu_{\Sigma \text{чист}}$  – суммарный коэффициент вытяжки в чистой группе клетей.

В настоящей работе рассмотрен вопрос о перспективах использования технологии прокатки-разделения на действующем непрерывном мелкосортном стане 250-1 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», расположение оборудования на этом стане и некоторые технические характеристики приведены в работе [13]. Установлено, что, исходя из возможностей оборудования стана, целесообразно осуществлять продольное разделение заготовки на две полосы в чистой группе клетей, определены изменения суммарных коэффициентов вытяжки и скорости прокатки по группам клетей. Для сопоставления скорости прокатки при классическом методе получения арматур-

ных профилей на стане и при прокатке-разделении использован коэффициент изменения скорости прокатки ( $k_v$ ), который определяли по формуле

$$k_v = \frac{V_{\text{п-р}} - V_{\text{к}}}{V_{\text{к}}} 100 \%$$

Рассчитаны и апробированы в промышленных условиях режимы прокатки, параметры которых (суммарные коэффициенты вытяжки и скорости прокатки) по группам клетей непрерывного мелкосортного стана 250-1 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» приведены на рис. 3, 4. При реализации процесса прокатки-разделения суммарное уменьшение площади поперечного сечения полосы в чистовых клетях в 1,8 – 2,0 раза больше, чем при классической прокатке при соответствующем уменьшении в черновой и промежуточной группах клетей. Такое перераспределение коэффициентов вытяжки по группам клетей позволило при прокатке арматуры № 12 исключить из промежуточной группы две клетки (10 и 11), при прокатке арматуры № 14 промежуточная группа полностью не используется. Перераспределение суммарных коэффициентов вытяжки по группам явилось причиной изменения скоростного режима: уменьшение скорости прокатки в чистовых и промежуточных клетях особенно существенно для арматуры № 14, а увеличение скорости прокатки в черновой группе.

В итоге при освоении прокатки-разделения удалось уменьшить машинное время ( $t$ ) при производстве арматурных профилей № 10 – № 14 в условиях действующего непрерывного мелкосортного стана 250-1 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» (рис. 5). Уменьшение машинного времени привело к увеличению производительности для арматуры № 10 на 42 %, № 12 – на 41 % и

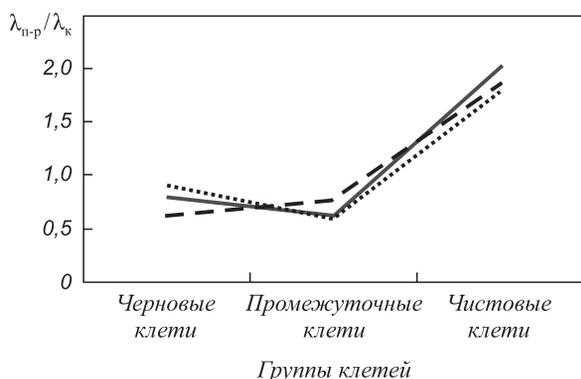


Рис. 3. Относительное изменение суммарных коэффициентов вытяжки при прокатке-разделении и классической прокатке ( $\lambda_{\text{п-р}}/\lambda_{\text{к}}$ ) по группам клетей в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» для различной арматуры:

—, --- и ..... – арматура № 12, № 10 и № 14

Fig. 3. Relative change of cumulative reduction rates when rolling  $\lambda_{\text{п-р}}/\lambda_{\text{к}}$  according to the mills in the conditions of continuous light-section mill 250-1 of OJSC “EVRAZ ZSMK” for different reinforcement:

—, --- and ..... – reinforcement no. 12, no. 10 and no. 14

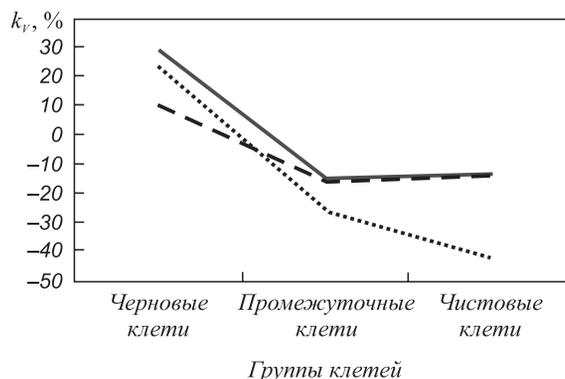


Рис. 4. Коэффициент изменения скорости прокатки ( $k_v$ ) по группам клетей при реализации процесса прокатки-разделения в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» для различной арматуры:

—, --- и ..... – арматура № 12, № 10 и № 14

Fig. 4. Coefficient of rolling speed change ( $k_v$ ) according to the mills at the realization of the process of rolling-division in the conditions of continuous light-section mill 250-1 of OJSC “EVRAZ ZSMK” for different reinforcement:

—, --- and ..... – reinforcement no. 12, no. 10 and no. 14

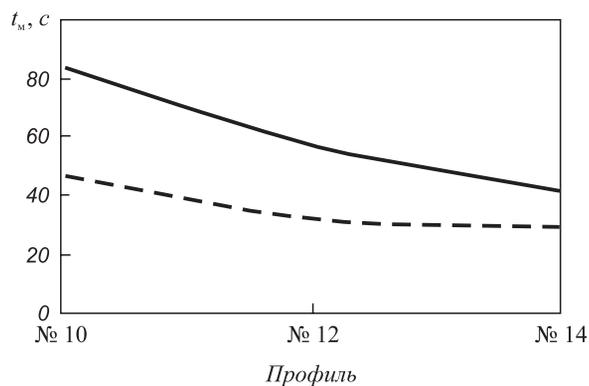


Рис. 5. Машинное время при прокатке арматуры № 10, № 12 и № 14 классическим способом (—) и прокаткой-разделением (---) в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Fig. 5. Machine time when rolling reinforcement no. 10, no. 12 and no. 14 by the classical way (—) and rolling-division (---) in the conditions of continuous light-section mill 250-1 of OJSC “EVRAZ ZSMK”

№ 14 – на 27 %, что, в свою очередь, способствовало повышению эффективности производства действующего непрерывного мелкосортного стана. Аналогичный эффект получен при использовании технологии прокатки-разделения на стане 320/150 ОАО «Амурметалл» [14].

Отдельно необходимо остановиться на опыте прокатки арматуры № 8 в условиях непрерывного мелкосортного стана. Обычно такой профиль прокатывается на проволочных станах и поставляется в бунтах, однако такое положение дел не устраивает большинство потребителей, для которых более привлекательна продукция в прутках. Использование процесса прокатки-разделения позволяет увеличить суммарный коэффициент вытяжки и без существенных материальных затрат освоить производство арматуры № 8 на непрерывном мелкосортном стане. Была проведена опытно-промышленная прокатка арматуры № 8 в условиях непрерывного мелкосортного стана 250-1 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», сопоставлены коэффициенты вытяжки и скорости прокатки при производстве арматуры № 8 на непрерывном проволочном стане 250 и непрерывном мелкосортном стане 250 из одинаковой заготовки – квадрата 100 мм (рис. 6). Использование процесса прокатки-разделения дает возможность при производстве арматуры № 8 на мелкосортном стане использовать на четыре клетки меньше, чем на проволочном стане. На непрерывном мелкосортном стане возможно при сопоставимой с проволочным станом производительности (несмотря на меньшую скорость прокатки в чистовой клетке) снизить эксплуатационные расходы на оборудование, энергозатраты, создать условия производства экономически выгодной, конкурентоспособной продукции (рыночная стоимость арматуры № 8 в прутках на 1000 – 1500 руб./т выше, чем в бунтах).

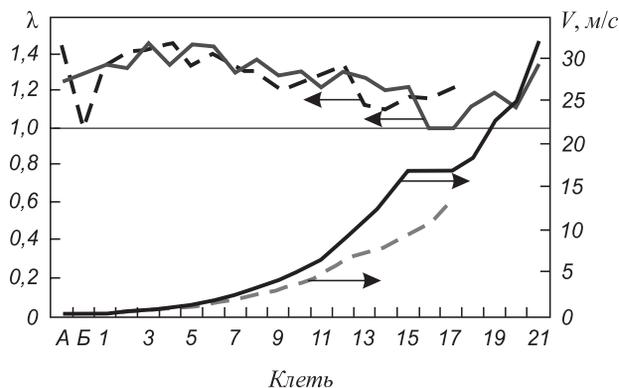


Рис. 6. Распределение коэффициентов вытяжки ( $\lambda$ ) и скоростей прокатки ( $V$ ) по клетям при производстве арматуры № 8 классическим способом (—) на проволочном стане и прокаткой-разделением (---) на непрерывном мелкосортном стане 250-1 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Fig. 6. Distribution of the reduction coefficient ( $\lambda$ ) and rolling speed ( $V$ ) according to the mill when producing reinforcement no. 8 by the classical way (—) at the wire mill and rolling-division (---) at the continuous light-section mill 250-1 of OJSC “EVRAZ ZSMK”

**Выводы.** На основании результатов моделирования процессов прокатки в сортовых калибрах простой формы определены и экспериментально подтверждены закономерности течения поверхностных слоев заготовок и их влияние на формирование напряженно-деформированного состояния металла в процессе прокатки. С учетом сформулированных рекомендаций разработана и прошла опытно-промышленное опробование новая калибровка валков черновой группы клеток непрерывного мелкосортного стана 250-2 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», использование которой позволило увеличить выход годного при производстве проката из качественных конструкционных сталей на 3 %. Проведена оценка повышения эффективности производства за счет увеличения производительности при внедрении процесса прокатки-разделения в условиях действующего непрерывного мелкосортного стана 250-1 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК». Доказана возможность расширения сортамента действующих мелкосортных станов за счет освоения мелких арматурных профилей при использовании процесса прокатки-разделения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Асанов В.Н., Стеблов А.Б., Тулупов О.Н., Ленартович Д.В. Совершенствование калибровки валков для прокатки круглых и арматурных профилей // Сталь. 2008. № 11. С. 90, 91.
2. Уткин Г.С., Резвов Б.С., Храпцов В.В. и др. Интенсификация выработки поверхностных дефектов при производстве заготовок // Производство проката. 2004. № 4. С. 18 – 22.
3. Перетягко В.Н., Рогов Ю.Е., Журавлев Б.К., Нефедов В.М. Выработка поверхностных дефектов в ящичных калибрах // Изв. вузов. Черная металлургия. 2011. № 2. С. 26 – 29.
4. Салганик В.М., Песин А.М., Пустовойтов Д.О. Моделирование поведения поперечных угловых трещин сляба при прокатке в горизонтальных валках // Изв. вузов. Черная металлургия. 2010. № 3. С. 22.

5. Кадьков В.Н., Мартыанов Ю.А., Уманский А.А. Влияние калибровки прокатных валков на выработку поверхностных дефектов // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. 2011. Вып. 27. С. 132 – 136.
6. Уманский А.А., Мартыанов Ю.А. Моделирование процессов выработки поверхностных дефектов заготовки при различных условиях прокатки // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. 2012. Вып. 30. С. 51 – 58.
7. Следнев В.П. Спаренная прокатка сортовых профилей. – М.: Металлургия, 1988. – 167 с.
8. Шульгин Г.М., Нечепоренко В.А., Шеремет В.А. и др. Двухручьевая прокатка-разделение арматурной стали на Криворожском металлургическом комбинате «Криворожсталь» // Производство проката. 1998. № 3. С. 12 – 17.
9. Matsuo G, Suzuki M. The latest Technology of Multy – slit rolling // SEA. ISI Quaterly. 1995. № 3. P. 49 – 58.
10. Жучков С.М. Особенности технологической схемы процесса трехниточной прокатки-разделения на мелкосортном стане 320/150 Белорусского металлургического завода // Металлург. 2001. № 1. С. 46, 47.
11. Ефимов О.Ю., Чинокалов В.Я., Фастыковский А.Р., Копылов И.В. Использование технологии прокатки-разделения на стане 250-1 // Сталь. 2008. № 8. С. 78 – 80.
12. Жучков С.М. Особенности конструкции устройства продольного разделения раската для трехниточной прокатки-разделения // Металлург. 2000. № 11. С. 42, 43.
13. Фастыковский А.Р., Волков К.В., Перетятко В.Н. и др. Совершенствование технологии производства арматурных профилей на непрерывных мелкосортных станах // Изв. вузов. Черная металлургия. 2011. № 10. С. 18 – 21.
14. Перунов Г.П., Лиманкин В.В., Волков К.В. и др. Освоение технологии прокатки-разделения арматурной стали на мелкосортно-проволочном стане 320/150 ОАО «Амурметалл» // Производство проката. 2006. № 10. С. 16 – 19.

Поступила 20 января 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. VOL. 58. No. 5, pp. 322–327.

## THEORY AND PRACTICE OF RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES OF MILL BAR PRODUCTION AT THE OPERATING CONTINUOUS ROLLING MILLS

*Fastykovskii A.R., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of ferrous metallurgy “Metal Forming and Metal Science, OJSC “EVRAZ ZSMK”*

*Umanskii A.A., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of ferrous metallurgy (umanskii@bk.ru)*

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

**Abstract.** Based on the modeling results of the processes of high-quality rolling in calibers of a simple form, the flow patterns of surface layers of the blanks and their influence on the formation of stress-strain state of the metal in the rolling process have been determined and confirmed experimentally. Subject to the formed recommendations a new calibration of rolls of roughing mill of continuous light-section mill 250-2 of OJSC «EVRAZ ZSMK» has been developed and passed the trial approbation. Its use has increased the yield in the production of high-quality rolled structural steel by 3 %. The evaluation to improve the production efficiency by increasing productivity in the implementation process of rolling-separation under the existing continuous light-section mill 250-1 of OJSC «EVRAZ ZSMK» has been conducted. A technique for determining the multiplicity of separation depending on the desired performance increments has been offered, as well as provided the guidance on the calculation of the speed limit in the roughing and finishing stand continuous mill, the actual data on the change of the total reduction ratio and speed conditions on groups stands in the preparation of rebars no. 10, no. 12, no. 14.

**Keywords:** resource-saving technologies, flat-and-edge rolling, waste, roll pass design, process of rolling-separation.

**DOI:** 10.15825/0368-0797-2015-5-322-327

### REFERENCES

1. Asanov V.N., Steblov A.B., Tulupov O.N., Lenartovich D.V. Improved grooving when rolling round profiles and reinforcement. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 11, pp. 929–931.
2. Utkin G.S., Rezvov B.S., Khramtsov V.V., Veis A.I., Yurkov V.I. Production intensification of surface defects at blanks producing. *Proizvodstvo prokata*. 2004, no. 4, pp. 18–22. (In Russ.).
3. Peretyat'ko V.N., Rogov Yu.E., Zhuravlev B.K., Nefedov V.M. Production of surface defects in box passes. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 2, pp. 26–29. (In Russ.).
4. Salganik V.M., Pesin A.M., Pustovoitov D.O. Behavior modelling of cross crotchcorner cracks of slab when rolling in horizontal rollers. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 3, pp. 22. (In Russ.).
5. Kadykov V.N., Mart'yanov Yu.A., Umanskii A.A. Impact of roll pass design on the production of surface defects. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii RAEN. Otdelenie metallurgii*. 2011, Issue 27, pp. 132–136. (In Russ.).
6. Umanskii A.A., Mart'yanov Yu.A. Process modeling of the production of surface defects of blanks at different conditions of rolling. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii RAEN. Otdelenie metallurgii*. 2012, Issue 30, pp. 51–58. (In Russ.).
7. Slednev V.P. *Sparennaya prokatka sortovykh profilei* [Duplex rolling of section bars]. Moscow: Metallurgiya, 1988. 167 p. (In Russ.).
8. Shul'gin G.M., Necheporenko V.A., Sheremet V.A., Kostyuchenko M.I., Minaev A.A., Babenko M.A., Kukui D.P., Korin' A.A. Two-pass rolling-division of reinforcing steel at Krivorozhskii integrated iron-and-steel works «Krivorozhstal'». *Proizvodstvo prokata*. 1998, no. 3, pp. 12–17. (In Russ.).
9. Matsuo G, Suzuki M. The latest Technology of Multy – slit rolling. *SEA. ISI Quaterly*. 1995, no. 3, pp. 49–58.
10. Zhuchkov S.M. Particularities in technological scheme for process of three-strand rolling-slitting at 320/150 wire-rod mill. *Metallurg*. 2001, no. 1, pp. 46–47.
11. Efimov O.Yu., Chinokalov V.Ya., Fastykovskii A.R., Kopylov I.V. Employing rolling and separation technology in the 250-1 mill. *Steel in Translation*. 2008, no. 8, pp. 671–673.
12. Zhuchkov S.M. Particularities in design of device for slitting the workpiece in three-strand rolling-slitting process. *Metallurg*. 2000, no. 11, pp. 42–43.
13. Fastykovskii A.R., Volkov K.V., Peretyat'ko V.N. etc. Improvement of the production technique of rebars at continuous light-section rolling mill. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 10, pp. 18–21. (In Russ.).
14. Perunov G.P., Limankin V.V., Volkov K.V., Baldin S.M., Chizh S.A., Sukhopleyuev V.A., Shesternin A.P., Smirnov V.K., Ignatovich Yu.V. Development of the rolling-division technology of reinforcing steel at light-section wire mill 320/150 of JSC «Amurmetall». *Proizvodstvo prokata*. 2006, no. 10, pp. 16–19. (In Russ.).

Received January 20, 2015

УДК 621.771.262

## НОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОКАТКИ ТРАМВАЙНЫХ ЖЕЛОБЧАТЫХ РЕЛЬСОВ

*Перетяцько В.Н.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор кафедры обработки металлов давлением  
и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК*

*Сметанин С.В.<sup>2</sup>, к.т.н., начальник центральной лаборатории автоматизации и механизации*

*Филиппова М.В.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры обработки металлов давлением  
и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК (flippova\_mv@mail.ru)*

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

<sup>2</sup> **ОАО «ЕВРАЗ – ЗСМК»**  
(654043, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, шоссе Космическое, 16)

**Аннотация.** Несмотря на большое разнообразие типов рельсов, применяемых в промышленности, методы их калибровки практически одинаковы. Однако калибровка желобчатых рельсов, применяемых в основном для трамвайных путей, в отличие от обычных рельсов имеет свои особенности в формировании желоба. Приведены результаты компьютерного моделирования и промышленных экспериментов, в результате которых исследовано распределение осевой пористости и произведена оценка деформированного состояния металла при прокатке в черновых и чистовых калибрах с целью разработки и внедрения новой технологии прокатки трамвайных желобчатых рельсов. По результатам компьютерного моделирования были проведены промышленные исследования распределения осевой пористости при прокатке в черновых ящичных калибрах клетки BD-1 и разрезных рельсовых калибрах в клетки BD-2. Изучения макроструктуры проводили на темплетях непрерывнолитой заготовки после второго, седьмого и девятого пропусков в клетях BD-1, BD-2. Результаты промышленного эксперимента и компьютерного моделирования показали хорошую их сходимость.

**Ключевые слова:** прокатка, рельс, черновые калибры, интенсивность деформаций, интенсивность напряжений, трамвайные рельсы, новая технология.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-328-334

В связи с реконструкцией рельсобалочного производства на ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» и запуском современного прокатного стана технология изготовления всех прокатываемых профилей потребовала углубленного изучения.

Калибровка желобчатых рельсов, используемых в основном для трамвайных путей, в отличие от калибровки обычных рельсов имеет свои особенности в формировании желоба [1 – 3]. С целью разработки оптимальной технологии прокатки трамвайных желобчатых рельсов было исследовано деформированное состояние металла при прокатке с использованием компьютерного комплекса Deform-3D.

Известно, что прокатка рельсовых профилей в черновых калибрах во многом предопределяет качество готового профиля, поэтому основной задачей здесь ставится максимальная проработка осевой ликвации в этих калибрах с перераспределением ее в область шейки рельсового профиля, при этом ширина ликвационной зоны в готовом профиле не должна превышать 0,5 толщины шейки [1].

После проведенной реконструкции машины непрерывного литья заготовок электросталеплавильного цеха ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» высотный размер поперечного сечения заготовки был изменен в сторону увеличения, при этом габариты НЛЗ составляют  $H \times B = 365 \times 300$  мм

взамен предыдущих 330×300 мм. Увеличение размера большей стороны НЛЗ примерно на 10 % потребовало проведение углубленных исследований по выбору оптимальной последовательности и конфигурации ящичных и разрезных калибров, обеспечивающих требуемое распределение осевой пористости при прокатке в черновой группе клеток нового рельсобалочного стана ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК». На рис. 1 показана схема прокатки трамвайных рельсов Т62 из НЛЗ в черновых клетях BD-1, BD-2 и чистовой группе клеток Tandem. Режимы деформации металла в черновых клетях BD-1 и BD-2 приведены в ниже [4, 5]:

Пропуск	H, мм	B, мм	Обжатие, мм		Кантовка
			BD-1		
0	365	300	–	–	–
1	330	310	35		1
2	295	320	35		0
3	259	310	61		1
4	204	320	55		0
5	293	212	27		1
6	268	219	25		0
7	185	280	34		1

BD-2				
8	170	200,00	110	1
9	90	210,68	80	0
10	60	220,02	30	0
11	40	226,55	20	0
12	28	233,66	12	0

В черновых калибрах абсолютное обжатие за пропуск изменяется в широких пределах: от 110 до 12 мм. Суммарное абсолютное обжатие вдоль оси шейки рельса составляет 150 мм и в перпендикулярном направлении 112 мм.

Модельная заготовка размерами 365×300 мм из рельсовой стали имела площадь поперечного сечения

109 500 мм<sup>2</sup>. По оси заготовки (по всей ее длине) выполнено отверстие диам. 40 мм, которое имитирует опасную зону осевой пористости, площадь поперечного сечения этого отверстия составляла 1256,6 мм<sup>2</sup>.

Условия моделирования следующие: температура заготовки 1150 °С; средняя скорость прокатки 3,5 м/с; коэффициент трения 0,3; температура окружающего воздуха 20 °С. Оборудование и условия моделирования соответствуют реальному технологическому процессу.

По результатам моделирования было изучено формоизменение металла, распределение интенсивности деформаций в поперечном сечении раската после каждого пропуска [6, 7].

Изучение формоизменения металла показало, что все калибры полностью заполняются металлом. По-

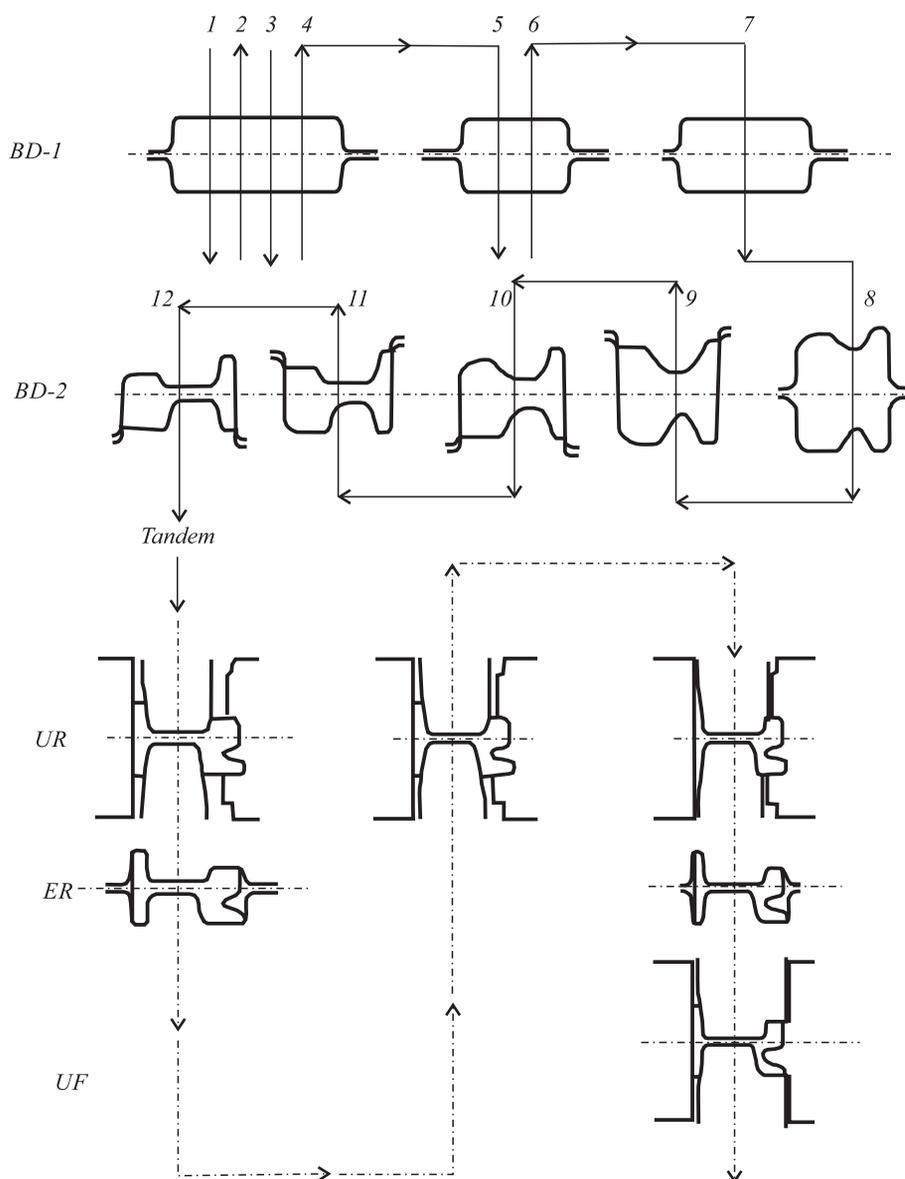


Рис. 1. Схема прокатки трамвайных рельсов Т62 в черновых клетях BD-1, BD-2 и чистовой группе клетей Tandem рельсобалочного стана ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК»

Fig. 1. Scheme of T62 tram rail rolling in the roughing stand BD-1, BD-2 and finishing group of stands Tandem of OJSC "EVRAZ ZSMK" rolling mill

верхностные дефекты на раскате отсутствуют. Зона осевой пористости по всем пропускam располагается в центральной части раската, при этом площадь  $S$  поперечного сечения осевой пористости уменьшается с увеличением коэффициента вытяжки. Ниже приведено изменение площади поперечного сечения осевой пористости в зависимости от суммарного коэффициента вытяжки:

Номер пропуска	Суммарная вытяжка	$S$ , мм
0	0	1256,64
1	1,062	1121,55
2	1,160	998,24
3	1,320	841,16
4	1,630	479,01
5	1,744	442,02
6	1,960	412,33
7	2,200	364,50
8	2,540	237,50
9	3,240	40,13
10	4,130	0
11	5,110	0
12	6,020	0

Распределение полей интенсивности деформаций  $\left( \varepsilon_e = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2^2} \right)$  в поперечном сечении раската показано на рис. 2, из которого видно, что распределение интенсивности деформаций по сечению раската неравномерно. Поверхностные слои раската, которые в первую очередь вступают в контакт с валками, имеют наибольшие значения интенсивности деформаций, которые убывают от поверхности к центральным слоям.

Наибольшие значения интенсивности деформаций после второго пропуска в ящичном калибре (рис. 2, а) соответствуют металлу, находящемуся по радиусам сопряжения горизонтальной бочки с выпусками калибра, и составляют  $\varepsilon_e = 1,46$ . При этом интенсивность деформаций равномерно убывает к центральным слоям до значений  $\varepsilon_e = 0,364$ .

На исследованных темплетах хорошо видно формoизменение центрального отверстия, которое моделирует формoизменение осевой пористости. Площадь поперечного сечения осевой пористости после второго пропуска составляет  $S = 998,24 \text{ мм}^2$ . Наибольшую интенсивность деформации после седьмого пропуска в ящичном калибре (рис. 2, б) также имеет металл, находящейся по радиусам сопряжения бочки вала с выпусками калибра. Максимальные значения интенсивности деформаций составляют  $\varepsilon_e = 0,87$ , при этом

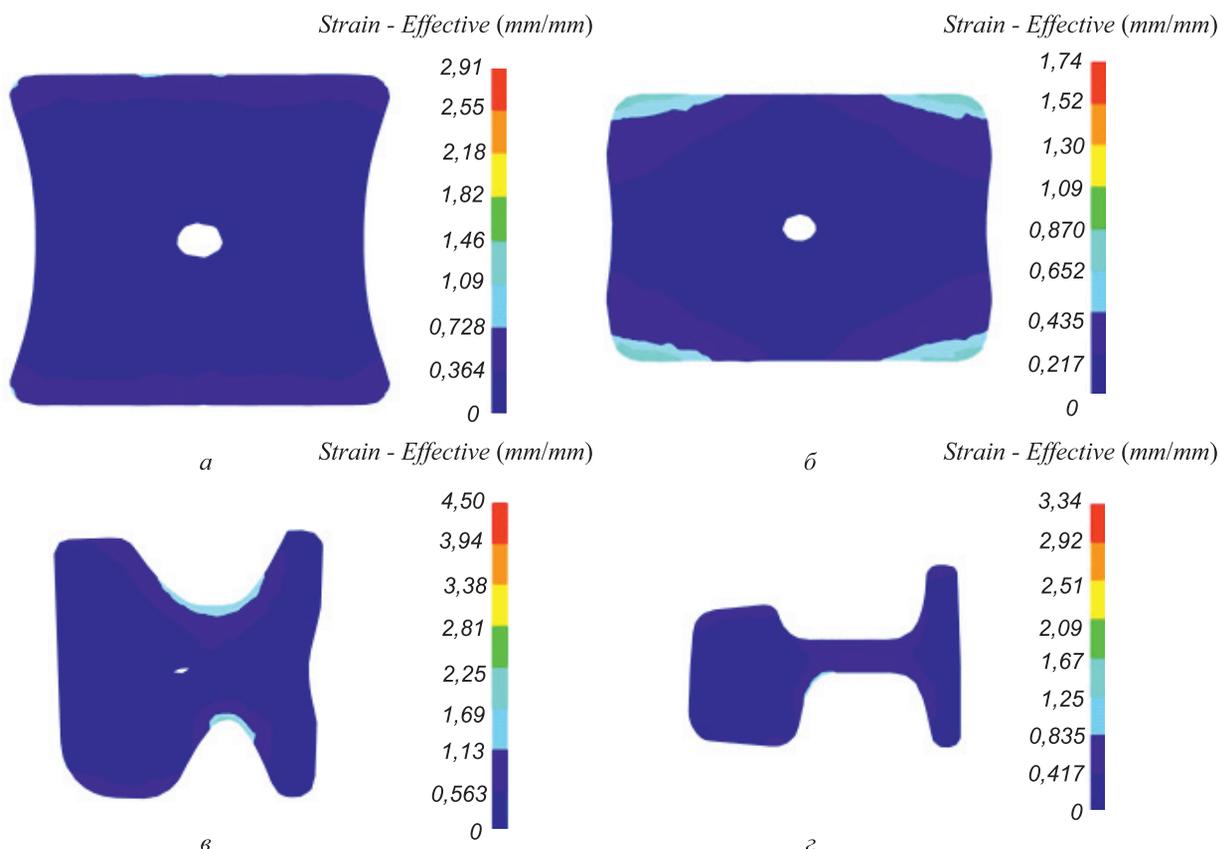


Рис. 2. Распределение полей интенсивности деформации после второго (а), седьмого (б), девятого (в) и двенадцатого (з) пропусков

Fig. 2. Distribution of intensity fields of deformation after the second (a), the seventh (б), the ninth (в) and the twelfth (з) passes

картина распределения полей интенсивности деформаций в этом пропуске отличается от таковой второго пропуска тем, что данные поля распределяются от угловых частей раската к центральным слоям и имеют ромбическую форму, вызванную защемлением раската, а площадь поперечного сечения осевой пористости уменьшилась до  $S = 364,5 \text{ мм}^2$ .

После девятого пропуска в рельсовом разрезном калибре закрытой формы с односторонним расположением разъемов распределение интенсивности деформаций крайне неравномерно (рис. 2, в), что обусловлено геометрическими факторами калибра. Установлено, что наибольшие значения  $\epsilon_e = 2,25$  в девятом пропуске соответствуют разрезному гребню по закрытому ручью при угле гребня  $77^\circ$  с радиусом притупления  $R = 16 \text{ мм}$ , причем поля интенсивности деформаций с максимальными значениями располагаются в верхней части гребня. Средние значения  $\epsilon_e = 1,69$  соответствуют верхнему горизонтальному валку с углом разрезного гребня  $100^\circ$  и  $R = 30 \text{ мм}$ , при этом поля интенсивности деформаций располагаются до половины высоты разрезного гребня. При прокатке в девятом калибре наблюдается явление перемещения металла фланца подошвы из открытого ручья в закрытый из-за того, что фланец подошвы в открытом ручье получает чрезмерно большое боковое обжатие, и, как следствие, такое перемещение металла сопровождается большим расходом энергии на прокатку и вызывает значительный износ калибра. После десятого пропуска происходит заваривание и сжатие осевой пористости, которая становится сосредоточенной и располагается в шейке профиля, что является допустимым, и в последнем калибре клетки BD-2 ее раскрытия не происходит (рис. 2, г).

Наиболее наглядным показателем, определяющим объемное напряженное состояние металла, является распределение интенсивности напряжений в поперечном сечении раската [8]. Полученные значения интенсивности напряжений

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2}$$

исследовали во втором, седьмом девятом и двенадцатом пропусках.

Распределение полей интенсивности напряжений после второго пропуска симметрично относительно вертикальной оси. Максимальные значения интенсивности напряжений составляют  $\sigma_e = 167 \text{ МПа}$  и соответствуют поверхностным слоям, контактирующим с горизонтальными валками. Значения интенсивности напряжений убывают от поверхности к центральным слоям. В центральных слоях выделяются три шаровых зоны с минимальными значениями  $\sigma_e = 104 \text{ МПа}$ , располагающихся по обе стороны от осевой пористости, причем по периметру осевой пористости со стороны горизонтальных валков также выделяются аналогичные

зоны минимальных значений  $\sigma_e$ . Характер распределения полей интенсивности напряжений после седьмого пропуска аналогичен характеру распределения полей интенсивности деформаций. Полученное поле напряжений имеет также ромбическую форму, а максимальные значения соответствуют местам защемления полосы в радиусах сопряжения горизонтальной бочки валка с выпусками калибра и составляют  $\sigma_e = 162 \text{ МПа}$ . Максимальные значения  $\sigma_e$  после девятого пропуска в разрезном калибре клетки BD-2 составляют  $125 - 167 \text{ МПа}$  и располагаются по периметру ручьев калибра.

Стоит отметить, что фланец подошвы при проникновении в закрытый ручей встречает значительные сопротивления со стороны наклонной стенки гребня и со стороны боковой стенки калибра, что вызывает значительные напряжения  $\sigma_e = 167 \text{ МПа}$  по фланцу в закрытом ручье, в котором металл как бы протягивается через него. В открытом ручье фланец подошвы находится в пространстве между двумя коническими плоскостями, вращающимися с разными окружными скоростями, при этом фланец обжимается по толщине, что вызывает значительные напряжения  $\sigma_e = 125 \text{ МПа}$  со стороны опорной части подошвы. В центральной части раската, в зоне нахождения осевой пористости, наблюдаются значительные напряжения ( $\sigma_e = 83 \div 125 \text{ МПа}$ ), что способствует проработке осевой пористости в тонкую полосу, располагающуюся в шейке профиля. Девятый пропуск является последним, после которого можно наблюдать осевую пористость, а после десятого происходит ее полное заваривание. В двенадцатом пропуске характер распределения напряжений зависит от распределения интенсивности деформаций и также зоны с максимальными значениями соответствуют шейке и краевым участкам фланцев головки и подошвы. Отметим, что прокатка в разрезных рельсовых калибрах является различной по времени с точки зрения обработки валками элементов раската [9].

Дальнейшая прокатка рельсового профиля проводится в клетях Tandem группы. Образование желоба осуществляется за четыре прохода, которые распределены по клетям UR (UR1, UR3, UR4) и UF; калибры – четырехвалковые с двумя горизонтальными приводными валками диам. 1200 мм и двумя вертикальными не приводными роликами, диам. 800 мм; скорость прокатки 3,5 м/с.

В связи с тем, что более 55 % (порядка 45 мм на разрезку при ширине желоба 29 мм) при разрезке головки приходится на первый пропуск, рассмотрим результаты формоизменения металла в клетях UR1 [10].

Распределение полей интенсивности деформаций в поперечном сечении калибра UR1 показано на рис. 3. Установлено, что элемент раската, который в первую очередь вступают в контакт с валками, – это гребень разрезного ролика с головкой профиля, после чего начинается образование желоба. При разрезке желоба поверхностные слои металла испытывают наибольшую

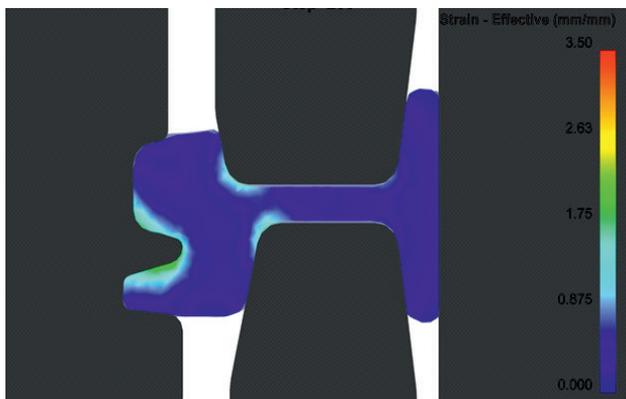


Рис. 3. Распределение полей интенсивности деформаций в первом калибре разрезки головки рельса – UR1

Fig. 3. Distribution of intensity fields of deformation in the first caliber of railhead cutting – UR1

деформацию [5]. Отчетливо просматривается зона усиленного роста полей интенсивности деформаций, которая располагается по оси разрезного гребня и боковым поверхностям желоба, что соответствует наибольшим перемещениям объемов металла. За счет значительной местной деформации металла при разрезке наблюдается вынужденное уширение металла по границам желоба. Значения интенсивности деформаций в поверхностных слоях металла по всему периметру желоба больше единицы, что указывает на значительные обжатия. Об-

жатие по подошве в проходе UR1 составляет порядка 3,5 мм, при этом значения интенсивности деформаций составляют менее 0,3. Также отмечаются две зоны с интенсивностью деформации  $\epsilon_e = 0,7 - 1,4$  в местах сопряжения шейки с головкой профиля.

Компьютерное моделирование прокатки металла в калибрах UR3 и UR4 показало, что в них не происходит значительных деформаций металла при формировании желоба. Распределение полей интенсивности деформаций в чистовом пропуске близко к равномерному, при этом значения  $\epsilon_e$  изменяются от нуля до 0,5. Значения интенсивности деформаций в поперечном сечении меньше единицы, что говорит о незначительных деформациях по периметру раската. Максимальные значения  $\epsilon_e = 0,5$  располагаются в трех зонах: первая – радиусы сопряжений шейки и подошвы; вторая – радиусы сопряжения шейки и головки и третья – в вершине разрезаемого желоба, т.е. в тех местах, где металл находится в стесненных условиях по отношению ко всему своему объему.

По результатам компьютерного моделирования проведены промышленные исследования распределения осевой пористости при прокатке в черновых ящичных калибрах клетки BD-1 (рис. 4) и разрезных рельсовых калибрах в клетке BD-2.

Изучения макроструктуры НЛЗ проводили на теплотах, отобранных от трех плавок стали Э76, отлитых на МНЛЗ-1. Для проведения промышленных экспери-

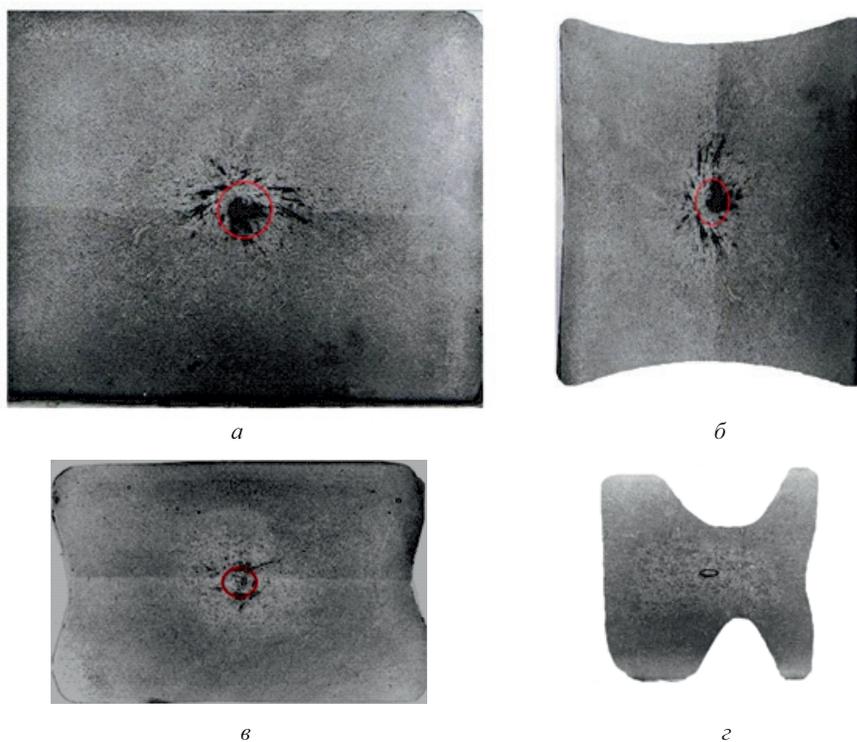


Рис. 4. Распределение осевой пористости по сечению раската:

*a* – исходная НЛЗ 365×300 мм; *б*, *в* и *з* – поперечное сечение раската после второго, седьмого и девятого пропусков соответственно

Fig. 4. Distribution of axial porosity over the cross section of the roll:

*a* – the original NLZ 365×300 mm; *б*, *в* and *з* – cross-section of the roll after the second, the seventh and the ninth passes

ментов выбрали НЛЗ с максимальной осевой пористостью (рис. 4, а). Макроструктуру поперечного сечения раската выявляли глубоким травлением в 50 %-ом водном растворе соляной кислоты поверхности отрезанных темплетов после второго (рис. 4, б), седьмого (рис. 4, в) и девятого (рис. 4, г) пропусков в клетях ВД-1, ВД-2, полученных из отобранных проб методами холодной механической обработки (строжки, шлифовки).

На фотографиях полученных темплетов оконтурена область с наиболее опасной зоной осевой пористости, соотнесенная с результатами компьютерного моделирования. Прокатка в разрезных рельсовых калибрах характеризуется неравномерной высотной деформацией, за счет чего происходят вынужденное уширение металла и интенсивная высотная деформация шейки рельсового профиля, что приводит к уменьшению площади поперечного сечения осевой пористости по оси симметрии рельсового профиля. Причем в готовом рельсовом профиле осевая пористость имеет вид полоски толщиной до 5 мм и длиной не более 110 мм со смещением в сторону подошвы и не выходит за габариты шейки. Стоит отметить, что большие напряжения в процессе пластической деформации зоны осевой пористости способствуют интенсивной проработке несплошности раската.

По результатам компьютерного моделирования заваривание осевой несплошности происходит после девятого пропуска, что подтверждается результатами промышленного эксперимента – на заготовке с максимальной начальной осевой пористостью после десятого пропуска на темплете происходит ее полное заваривание.

Анализ макроструктуры и размеров поперечного сечения рельса после прокатки в чистовом калибре УГ показал, что металл профиля имеет хорошую структуру и требуемую геометрию, зона с осевой пористостью отсутствует. Прямолинейность, механические и прочностные характеристики полученных рельсов Т62 из стали марки Э76 соответствуют требованиям ТУ 14-2Р-320 – 96 на трамвайные желобчатые рельсы (рис. 5).

**Выводы.** Напряженно-деформированное состояние металла неравномерно по сечению раската и зависит от формы калибра. Распределения запаса пластичности напрямую зависят от распределения интенсивности напряжений по сечению металла. По данным компьютерного моделирования уменьшение площади осевой пористости пропорционально суммарному коэффициенту вытяжки. После десятого пропуска при общем коэффициенте вытяжки 4,13 в металле происходит полное заваривание внутреннего дефекта. На заваривание осевой несплошности в процессе прокатки влияет главным образом величина сжимающих напряжений на поверхности раската. Результаты промышленного эксперимента на заготовке с максимальной осевой пористостью показали хорошую сходимость с результатами компьютерных исследований.



Рис. 5. Опытная партия прокатанных трамвайных рельсов Т62

Fig. 5. A pilot batch of T62 rolled tram rails

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кучко И.И., Серкин М.Г., Рапопорт И.Б. Производство трамвайных рельсов новых типов // Сталь. 1956. № 8. С. 708 – 716.
2. Критинин И.А., Кошкин В.А., Дарушин Р.И. Повышение качества трамвайных желобчатых рельсов // Сталь. 1969. № 1. С. 52, 53.
3. Сапрыгин Х.М., Шарапов И.А., Могилевский И.И. Промышленное производство облегченных трамвайных рельсов // Сталь. 1982. № 2. С. 56, 57.
4. Литовченко Н.В. Калибровка профилей и прокатных валков. – М.: Металлургия, 1990. – 432 с.
5. Чекмарев А.П., Мутьев М.С., Машковцев Р.А. Калибровка прокатных валков. – М.: Металлургия, 1971. – 625 с.
6. Рыбин Ю.Н., Рудской А.И., Золотов А.М. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. – СПб.: Наука, 2004. – 664 с.
7. Володин И.М. Моделирование процессов горячей объемной штамповки. – М.: Машиностроение, 2006. – 253 с.
8. Перетяtko В.Н., Сметанин С.В., Волков К.В. Исследование напряженно-деформированного состояния металла при прокатке трамвайных рельсов в универсальном четырехвалковом калибре // Сталь. 2014. № 7. С. 36 – 39.
9. Полухин П.И., Грдина Ю.В. Прокатка и термическая обработка рельсов. – М.: Металлургия, 1963. – 510 с.
10. Перетяtko В.Н., Сметанин С.В., Филиппова М.В. Деформация металла в чистовом разрезном калибре при прокатке трамвайных желобчатых рельсов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2008. № 10. С. 68, 69.

Поступила 22 января 2015 г.

## NEW TECHNOLOGY OF TRAM GROOVED RAIL ROLLING

**Peretyat'ko V.N.**<sup>1</sup>, *Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Metal Forming and Metal Science. OJSC "EVRAZ ZSMK"*

**Smetanin S.V.**<sup>2</sup>, *Cand. Sci. (Eng.), Head of central laboratory of automation and mechanization*

**Filippova M.V.**<sup>1</sup>, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metal Forming and Metal Science. OJSC "EVRAZ ZSMK"* (filippova\_mv@mail.ru)

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

<sup>2</sup> **OJSC "EVRAZ ZSMK" – Joint West Siberian Metallurgical Plant** (16, Kosmicheskoe route, Novokuznetsk, Kemerovo region, 654043, Russia)

**Abstract.** Despite of the great variety of rails types used in the industry, methods of their calibration are almost identical. However, calibration of girder rails, mainly used for tramways, in contrast to conventional rails has its own peculiarities in the formation of the girder. The paper presents the results of the computer simulation and industrial experiments that include investigations of the distribution of axial porosity and evaluation of the strain state of metal during its rolling in roughing and finishing calibers for the development and introduction of a new rolling technology of tramway girder rails. According to the results of the conducted computer simulation the industrial study of axial distribution of porosity by rolling in the rough box-caliber stand BD-1 and split rail caliber stand BD-2 was carried out. Microstructure examination was made at the templates of continuous casting block, after the second, after the seventh and ninth passes in the stands BD-1, BD-2. The results of the industrial experiment showed a good agreement with the computer simulation results.

**Keywords:** rolling, rail, roughing gages, intensity of deformation, stress intensity, tram rails, new technology.

**DOI:** 10.15825/0368-0797-2015-5-328-334

## REFERENCES

1. Kuchko I.I., Serkin M.G., Rapoport I.B. Production of tram rails of new types. *Stal'*. 1956, no. 8, pp. 708–716 (In Russ.).
2. Kritinin I.A., Koshkin V.A., Darushin R.I. Improving of tram grooved rails. *Stal'*. 1969, no. 1, pp. 52–53 (In Russ.).
3. Saprygin Kh.M., Sharapov I.A., Mogilevskii I.I. Industrial production of lighted tram rails. *Stal'*. 1982, no. 2, pp. 56–57 (In Russ.).
4. Litovchenko N.V. *Kalibrovka profilei i prokatnykh valkov* [Calibration of profiles and rolling mills]. Moscow: Metallurgiya, 1990. 432 p. (In Russ.).
5. Chekmarev A.P., Mut'ev M.S., Mashkovtsev R.A. *Kalibrovka prokatnykh valkov* [Calibration of rolling mills]. Moscow: Metallurgiya, 1971. 625 p. (In Russ.).
6. RybinYu.N., Rudskoi A.I., Zolotov A.M. *Matematicheskoe modelirovanie i proektirovanie tekhnologicheskikh protsessov obrabotki metallov davleniem* [Mathematical modeling and designing of technological processes of fetal forming]. St. Petersburg: Nauka, 2004. 664 p. (In Russ.).
7. Volodin I.M. *Modelirovanie protsessov goryachei ob'emnoi shtampovki* [Modeling of forging processes]. Moscow: Mashinostroenie, 2006. 253 p. (In Russ.).
8. Peretyat'ko V.N., Smetanin S.V., Volkov K.V. Research of defected modes of metal at rolling of tram rails in a universal four-rolling groove. *Stal'*. 2014, no. 7, pp. 36–39. (In Russ.).
9. Polukhin P.I., Grdina Yu.V. *Prokatka i termicheskaya obrabotka rel'sov* [Rolling and thermal processing of rails]. Moscow: Metallurgizdat, 1963. 510 p. (In Russ.).
10. Peretyat'ko V.N., Smetanin S.V., Filippova M.V. Metal deformation in finishing fuller groove. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2008, no. 10, pp. 68–69. (In Russ.).

Received January 22, 2015

УДК 669.046:661.665

## МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫЕ ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ С НАНОКОМПОНЕНТАМИ: ФОРМИРОВАНИЕ, СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ\*

*Галевский Г.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов  
и химической технологии, директор Института металлургии и материаловедения (kafcmetsibsiiu.ru)*  
*Руднева В.В., д.т.н., профессор кафедры металлургии цветных металлов и химической технологии*  
*Гарбузова А.К., аспирант кафедры металлургии цветных металлов и химической технологии*

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

**Аннотация.** Исследованы условия электроосаждения, структура и физико-механические свойства (микротвердость, сцепление с основой, внутренние напряжения, износостойкость, токи коррозии) металломатричных композиционных покрытий на основе никеля с нанопорошком (НП) (размерный диапазон 0,02 – 0,08 мкм) карбида титана и его микропорошком (МП) (1 – 5 мкм). Установлено, что при электроосаждении никеля из электролита – суспензии металлический никель сначала осаждается на наночастицах, взвешенных в электролите, после чего наночастицы прочно прикрепляются к подложке, легко и равномерно врастают в осадок. В отличие от микропорошка, нанопорошок карбида является не только наполнителем, а выступает в качестве сильного структурообразователя в процессе электрокристаллизации никеля и обеспечивает ее массовый многозародышевый характер, что приводит к образованию покрытий с малыми размерами структурных фрагментов, характерного матового цвета, практически беспористых с повышенными физико-механическими свойствами. Покрытия содержат 97,39 % Ni; 1,79 % O; 0,65 % Ti; 0,17 % C. Отжиг покрытий в вакууме способствует повышению их сцепления с основой в 1,3 раза, микротвердости – в 1,2 раза, износостойкости – в 1,3 раза. Покрытие Ni – НП TiC рекомендовано для антикоррозионной защиты и упрочнения деталей, работающих на износ при средних окружных скоростях и невысоких удельных нагрузках.

**Ключевые слова:** никель, карбид титана, нанопорошок, микропорошок, композиционное покрытие, электролит – суспензия, условия электроосаждения, структура, физико-механические свойства.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-335-340

Металломатричные композиционные покрытия (ММКП) формируются при осаждении металла в виде тонкого слоя на изделия с электропроводящей поверхностью из электролитов – суспензий, содержащих дисперсную фазу (наполнитель). Технология композиционного электроосаждения получила развитие благодаря научным школам профессоров Р.С. Сайфуллина (Казанский государственный технологический университет), Г.В. Халдеева (Пермский государственный университет), Т.Е. Цупак (Российский государственный химико-технологический университет), В.Ю. Долматова (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет), основные достижения которых обобщены в работах [1 – 4]. Благодаря включению частиц в покрытие его эксплуатационные свойства повышаются, что позволяет с помощью ММКП успешно решать многие практические задачи по поверхностному упрочнению деталей и оснастки. Для улучшения характеристик металломатричных композиционных покрытий необходимо повышать уровень дисперсности упрочняющей фазы и в пределах использовать ее с такими частицами, размер которых существенно меньше размера зерна матрицы [5, 6]. Анализ накопленного опыта и оценка

современного состояния технологии ММКП позволяют сформулировать такие направления ее развития, как дальнейшее расширение номенклатуры и повышение качества вводимых в обращение упрочняющих наноматериалов, увеличение объемов их производства, необходимость решения крупномасштабных задач композиционного упрочнения [7 – 9].

Целью настоящего исследования является изучение особенностей формирования и свойств ММКП на основе никеля, содержащих в качестве упрочняющей фазы нано- и микропорошки карбида титана – синтетического сверхтвердого, тугоплавкого, жаропрочного материала, достаточно востребованного для производства металлообрабатывающего инструмента, карбидосталей и защитных покрытий. Металломатричные покрытия на основе никеля характеризуются наибольшим объемом использования в различных отраслях производства, составляющим 75 % от общего объема гальванически осаждаемых металлов. Основными функциями никелевых покрытий являются защита от коррозии и механических повреждений, улучшение прочностных характеристик и износостойкости изделий (особенно эксплуатируемых в условиях сухого трения), решение определенных декоративно-эстетических задач. Однако никелевые покрытия защищают стальную основу только механически, а в порах покрытия происходит

\* Работа выполнена в СибГИУ в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки России № 11.1531/2014/К.

ее коррозия. Никелевые покрытия, особенно в тонких слоях, не являются сплошными. При этом значительная пористость может быть выявлена в никелевом покрытии даже толщиной 20 мкм (рис. 1). Поэтому создание высокоплотных, практически беспористых никелевых покрытий до сих пор остается важной научно-прикладной задачей.

Для упрочнения никелевой матрицы использовали нанопорошок (НП) карбида титана, полученный карбидизацией порошка металлического титана марки ПТМк природным газом в потоке азотной плазмы (НП TiC) и

его микропорошок (МП), полученный диспергированием в течение 80 ч в мельнице с твердосплавными шарами и футеровкой карбида титана карботермического печного синтеза стандартной (–63 мкм) гранулометрии (МП TiC). Характеристики химического и фазового составов и дисперсности используемых порошков приведены в таблице, а микрофотографии нанопорошка – на рис. 2. Порошки карбида однофазные, содержат примеси, обусловленные технологией синтеза, и имеют размерный диапазон частиц, соответствующий 20 – 80 нм для нанопорошка, 1 – 5 мкм – для микропорошка. Карбидные наночастицы склонны к образованию микроагрегатов размером до 120 нм.

Исследование параметров осаждения ММКП проводили в стандартном электролите никелирования, содержащем 245 кг/м<sup>3</sup> NiSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 30 кг/м<sup>3</sup> H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, 20 кг/м<sup>3</sup> NaCl, 6 кг/м<sup>3</sup> NaF при pH 5,0 – 5,5, температуре 323 К, катодной плотности тока 0,1 – 1,2 кА/м<sup>2</sup>, концентрации порошка 1 – 100 кг/м<sup>3</sup> и непрерывном перемешивании электролита. В качестве катодов использовали стальные (Ст 3) образцы. Содержание карбида титана в композиционных покрытиях определяли весовым методом после растворения покрытия в 10 %-м растворе HNO<sub>3</sub> (ГОСТ 5744 – 94 с изм.). Процент включения карбида в матрицу рассчитывался как отношение массы нерастворимого остатка к массе покрытия.

Микротвердость покрытий измеряли на микротвердомере ПМТ-3 методом статического вдавливания перпендикулярно слою покрытия индентора при нагрузке 0,49 Н. Микротвердость покрытий определяли на образцах толщиной 40 мкм по 5 – 6 измерениям диагонали отпечатка.

Исследование влияния катодной плотности на содержание упрочняющей фазы в покрытии проводили при pH электролита 5,0, температуре 323 К и концентрации упрочняющей фазы 10 кг/м<sup>3</sup>. Можно видеть,

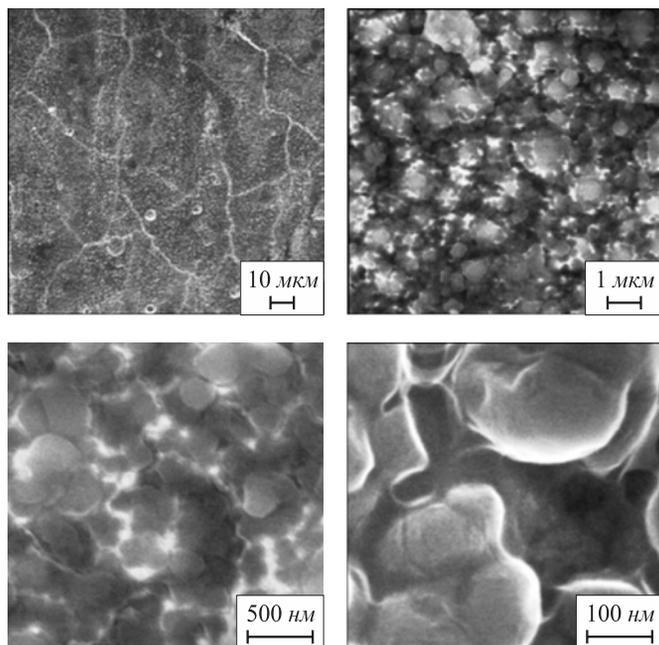


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение поверхности электроосажденного никеля

Fig. 1. Electron microscope image of a surface of the electrodeposited nickel

### Основные характеристики порошков карбида титана

#### Main characteristics of titanium carbide powder

Характеристика	НП TiC	МП TiC
Химический состав основной фазы	TiC <sub>0,95</sub> N <sub>0,05</sub>	TiC
Содержание основной фазы, %	93,02	96,63
Содержание примесей, %:		
свободный титан	1,80	–
свободный углерод	1,10	0,83
кислород	3,23	2,05
азот	1,18	0,24
летучие	0,89	0,25
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг	33 000 – 35 000	600
Размер частиц, мкм	0,02 – 0,08	1 – 5
Форма частиц	ограниченная, кубическая	осколочная, неправильная
Окисленность порошков ×10 <sup>7</sup> , кг O <sub>2</sub> /м <sup>2</sup>	9,1	34,2
Коррозионная стойкость в растворах электролитов	Устойчивы в щелочных и слабокислых растворах	

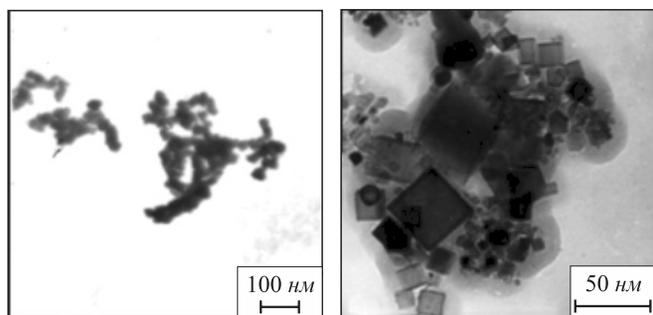


Рис. 2. Микрофотографии нанопорошка карбида титана

Fig. 2. Microphotos of nanopowder of titanium carbide

что повышение катодной плотности тока в пределах от 0,1 до 1,0 кА/м<sup>2</sup> для нанопорошка и 0,7 кА/м<sup>2</sup> для микропорошка приводит к увеличению содержания упрочняющей фазы в покрытии для НП TiC с 0,52 до 0,88 %, для МП TiC с 0,61 до 1,18 %. В то же время четко прослеживается тенденция к увеличению содержания упрочняющей фазы от ее крупности: при катодной плотности тока 1,0 кА/м<sup>2</sup> содержание упрочняющей фазы в покрытии составляет для НП TiC 0,88 и МП TiC 1,18 %. В присутствии упрочняющей нанодисперсной фазы верхний предел рабочей плотности тока электролита составляет 1,0 кА/м<sup>2</sup>, что выше, чем для получения никелевых покрытий в этом электролите (0,5 кА/м<sup>2</sup>). При катодной плотности тока 1,2 кА/м<sup>2</sup> покрытия образуются темного цвета, хрупкие и шероховатые, легко отслаивающиеся от основы. Это объясняется увеличением pH в прикатодном слое, обусловленным выделением на катоде водорода, и, как следствие этого, образованием и соосаждением с никелем его гидроксидов.

Исследование влияния концентрации порошков в электролите на содержание упрочняющей фазы в покрытии проводили при pH электролита 5,0, температуре 323 К и катодной плотности тока 1,0 кА/м<sup>2</sup> для нанопорошка и 0,7 кА/м<sup>2</sup> для микропорошка. Результаты исследований приведены ниже:

Концентрация НП, МП в электролите, кг/м <sup>3</sup>	Содержание упрочняющей фазы в ММКП, %/ Микротвердость, ± 0,3 ГПа	
	НП TiC	МП TiC
2,0	0,45/3,5	0,38/2,6
5,0	0,81/4,2	0,67/2,9
10,0	0,88/4,4	1,09/3,0
15,0	0,82/4,4	1,29/3,1
30,0	0,80/4,6	1,63/3,3
45,0	0,77/4,6	1,97/3,3
60,0	0,73/4,4	2,16/3,5
80,0	0,76/4,6	3,00/3,6
100,0	не проводили	2,99/3,5

Можно видеть, что с повышением концентрации нанопорошка в электролите – суспензии до 5 – 10 кг/м<sup>3</sup> содержание упрочняющей фазы в ММКП также растет, в дальнейшем при концентрации нанопорошков 15 – 30 кг/м<sup>3</sup> практически не меняется, а в области концентраций 45 – 80 кг/м<sup>3</sup> несколько снижается. Следовательно, с повышением крупности порошка карбида титана насыщение никелевой матрицы достигается при более высоких содержаниях в ней упрочняющей фазы.

Таким образом, представляется, что использование нанопорошка для получения композиционных покрытий более целесообразно, чем микропорошков. Оптимальными условиями осаждения ММКП никель – НП карбида титана являются: концентрация TiC – 5 – 10 кг/м<sup>3</sup>, катодная плотность тока – 0,9 – 1,0 кА/м<sup>2</sup> при температуре 323 К, pH – 5,0 – 5,5 и непрерывном перемешивании электролита. Выход никеля по току при этих условиях составляет 92 – 94 %.

Исследованы структура и основные свойства (твердость, сцепление со стальной основой, внутренние напряжения, коррозионные свойства, износостойкость) композиционного покрытия на основе никеля с нано- и микропорошком карбида титана и «чистого» никелевого покрытия, т.е. никелевой матрицы. Осаждение ММКП Ni – НП TiC осуществляли при концентрации нанопорошка в электролите 5 – 10 кг/м<sup>3</sup>, катодной плотности тока 1,0 кА/м<sup>2</sup>. При осаждении ММКП Ni – МП TiC концентрация микропорошка в электролите составляла 60 – 80 кг/м<sup>3</sup>, катодная плотность тока – 0,7 кА/м<sup>2</sup>. Для осаждения «чистых» никелевых покрытий использовали электролит, не содержащий дисперсной фазы.

Тонкую структуру ММКП с нанопорошком исследовали методами электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии. Внутренние напряжения покрытий измеряли методом деформации гибкого катода, сцепление покрытий со стальной основой определяли методом сдвиговых нагрузок, защитную способность покрытий оценивали по величине токов коррозии между покрытием и основой в нейтральном электролите, определяемых методом Розенфельда [10]. Износостойкость образцов толщиной 40 мкм определяли в условиях сухого трения. В качестве контртела использовали стальной шар диам. 0,014 м, выполненный из стали марки ШХ15 и закаленный до твердости 40 HRC, вращающийся под нагрузкой 0,8 Н со скоростью 2 об/с.

При электроосаждении материал композиционного покрытия начинает формироваться непосредственно в электролите, что подтверждается наличием на внешней оболочке частиц, взвешенных в электролите, тонкого слоя металла. В дальнейшем малый радиус частиц и большое отношение площади к массе частиц вызывает более легкое зарастивание их в никелевой матрице. Анализ энергодисперсионных спектров электроосажденного никеля и ММКП подтверждает присутствие в них следующих веществ: Ni, O и Ni, Ti, C, O. Количественные соотношения их близки к реальным. Эле-

ментный химический состав электроосажденного никеля (спектр 1) и ММКП Ni – НП TiC (спектры 2, 3) представлен ниже:

Элемент	Содержание элемента в отдельных точках покрытий, %, для спектра		
	1	2	3
	Ni	98,20	97,50
O	1,80	1,70	1,79
Ti	–	0,64	0,65
C	–	0,16	0,17

Так, по данным рентгеновского энергодисперсионного микроанализа содержание TiC в покрытии составляет 0,80 – 0,82 %, а по данным определения весовым методом – 0,85 – 0,88 %. При этом определяемые элементы Ti и C достаточно равномерно распределены в покрытии толщиной 30 мкм (рис. 3), что подтверждает его композиционный характер.

Микротвердость ММКП определяется содержанием в них упрочняющей фазы и размерами ее частиц (см. выше). Микротвердость ММКП Ni – TiC составляет 4,2 – 4,4 ГПа, что в 2,0 раза выше, чем у никелевой матрицы, в 1,45 раза выше чем у ММКП с НП TiC. Сцепление ММКП Ni – НП TiC со стальной основой составляет 30,7 – 32,8 МПа. Износостойкость ММКП Ni – НП TiC в 1,5 раза выше стойкости покрытия с микропорошком, в 1,7 раза – никелевого покрытия. Отжиг ММКП Ni – НП TiC в вакууме при температуре 873 К в течение 75 мин способствует повышению их сцепления с основой до 45,3 – 48,9 МПа (в 1,3 раза), микротвердости – до 5,2 ГПа (в 1,2 раза), износостойкости – в 1,3 раза.

Включение дисперсных частиц в покрытие приводит к снижению внутренних напряжений, особенно при использовании нанопорошка карбида титана. Так, если при толщине 40 мкм у композиционного покрытия с микропорошком TiC внутренние напряжения в 1,73 раза меньше, чем у чистого никеля, то с наночастицами – в 4,12 раза. Зависимость внутренних напряжений и токов коррозии от толщины покрытий приведены ниже:

Толщина покрытия, мкм	Внутренние напряжения, МПа/ Токи коррозии, мкА/см <sup>2</sup>		
	Ni	Ni – НП TiC	Ni – МП TiC
5	9,72/0,304	3,62/0,084	5,93/0,183
10	7,06/0,265	1,67/0,063	3,18/0,169
20	3,74/0,205	0,59/0,040	1,59/0,145
30	1,36/0,173	0,52/0,027	0,77/0,109
40	1,07/0,167	0,26/0,012	0,62/0,060

Этот эффект, по-видимому, объясняется образованием более мелкозернистой структуры растущего осадка за счет равномерно распределенных в нем частиц дисперсной фазы. Внедрение большего количества частиц микропорошка по сравнению с НП приводит к неравномерной деформации матрицы, захватывающей большие группы зерен, и, как следствие этого, к повышению внутренних напряжений и к снижению коррозионных характеристик.

Величина токов коррозии, возникающих в композиционных покрытиях, намного меньше, чем в никелевой матрице. При толщине покрытия 40 мкм, полученного при использовании микропорошка карбида, значение токов коррозии в нем в 2,78 раза меньше, чем в чистом никеле, а в случае применения нанопорошка карбида титана – меньше в 13,9 раза (см. выше), что свидетельствует об образовании практически беспористых ММКП Ni – НП TiC, обеспечивающих высокие защитные свойства.

Анализ полученных результатов позволяет выделить следующие основные факторы повышения эксплуатационных свойств ММКП никель – карбид титана. При электроосаждении никеля взвешенные в электролите наночастицы карбида благодаря гидродинамическим, молекулярным и электростатическим силам взаимодействуют с поверхностью растущего осадка, что приводит к образованию композиционного покрытия. При этом наночастицы карбида выступают в качестве центров кристаллизации, от которых начинается кристаллизация никеля. Благодаря большому количеству наночастиц карбида, участвующих в процессе, кристал-

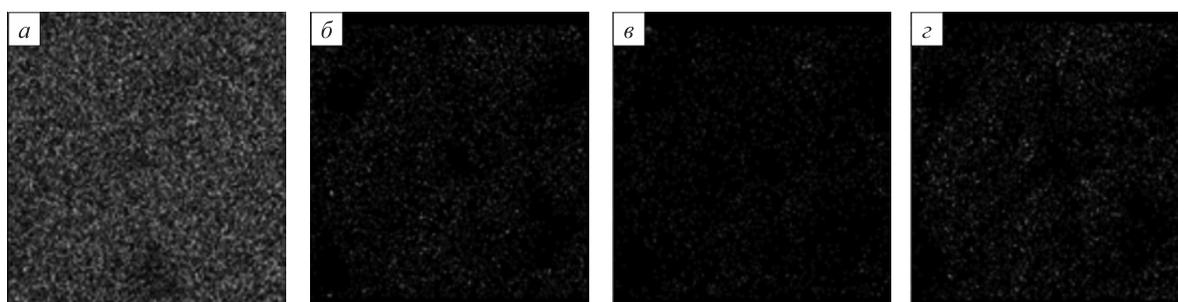


Рис. 3. Результаты микрорентгеноспектрального анализа распределения основных элементов в ММКП Ni – НП TiC: а – Ni; б – Ti; в – C; з – O

Fig. 3. Results of the microx-ray spectral analysis of the distribution of basic elements in MMKP Ni – nanopowder TiC: а – Ni; б – Ti; в – C; з – O

лизация носит массовый многозародышевый характер. Образующиеся при этом покрытия имеют характерный матовый цвет, очень низкую пористость и повышенные физико-механические свойства. Малый размер частиц карбида и кристаллитов никеля обеспечивает точное копирование микрорельефа поверхности, что увеличивает сцепление композиционного покрытия с основой. Относительно низкое содержание упрочняющей фазы в покрытии Ni – НП TiC обеспечивает значительно меньший ее расход на 1 м<sup>2</sup> обрабатываемой поверхности и позволяет сохранить ценные свойства матрицы. Низкая концентрация нанопорошка в электролите упрощает эксплуатацию гальванических ванн и снижает потери карбида титана за счет выноса электролита с деталями. Присутствие карбида титана повышает производительность электролита за счет увеличения верхнего предела катодной плотности тока.

Полученный комплекс свойств ММКП Ni – НП TiC позволяет рекомендовать их для антикоррозионной защиты деталей, а после термической обработки – для упрочнения деталей (валов, втулок, опор скольжения, шпинделей и др.), работающих на износ в условиях трения скольжения при средних (1,5 – 2,5 м/с) окружных скоростях и невысоких (5 – 6 МПа) удельных нагрузках.

**Выводы.** При электроосаждении никеля из электролита – суспензии, нанопорошок карбида титана одновременно выступает в качестве компонента композиционного покрытия никель – карбид титана и эффективного структурообразователя, что обеспечивает формирование покрытия с мелкозернистой беспористой структурой и высокими эксплуатационными свойствами. Определены технологические преимущества получения металломатричных композиционных покрытий на основе никеля с наноразмерным карбидом титана и технические области их наиболее рационального применения.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сайфуллин Р.С. Исследования в области создания композиционных электрохимических покрытий (КЭП) с дисперсной фазой микро- и наночастиц // Вестник Казанского технологического университета. 2009. № 6. С. 80 – 90.
2. Десяткова Г.И., Ягодкина Л.М., Савочкина И.Е., Халдеев Г.В. Композиционные электрохимические покрытия на основе никеля // Защита металлов. 2002. Т. 38. № 5. С. 525 – 529.
3. Цупак Т.Е. Высокопроизводительные процессы электроосаждения никеля и сплава никель – фосфор из электролитов, содержащих карбоновые кислоты: автореф. дисс. докт. хим. наук. – М., 2008. – 40 с.
4. Долматов В.Ю. Современная промышленная технология получения детонационных нанодмазов (НА) и основные области их использования. – В кн.: Нанотехнологии – производству – 2006: Труды международной научно-практической конференции. – М.: Янус-К, 2006. С. 113 – 151.
5. Ширяева Л.С., Ноздрин И.В., Галевский Г.В., Руднева В.В. Исследование композиционных электрохимических покрытий никель – нанокarbonитрид хрома // Гальванотехника и обработка поверхности. 2014. № 2. Т. XXII. С. 51 – 57.
6. Руднева В.В., Галевский Г.В. Особенности электроосаждения и свойства композиционных покрытий с наноконпонентами // Изв. вуз. Черная металлургия. 2007. № 3. С. 39 – 43.
7. Колпак В.П. Обеспечение гильзами кристаллизаторов МНЛЗ на ОАО «Запсибметкомбинат». – В кн.: 4-ая Международная конференция «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов»: Сб. докладов. – Харьков: ХГУ, 2003. С. 58 – 60.
8. Суховольский С.В. Влияние хром-никелевого покрытия кристаллизатора на качество поверхности непрерывной заготовки. – В кн.: Актуальные проблемы электрометаллургии, сварки, качества. Т. 1.: Труды Международной научно-практической конференции. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. С. 142 – 144.
9. Гамаюнов И.Г., Баранов А.Н. Защита блумсов алюминиевых электролизеров от коррозии. – В кн.: Перспективы развития технологии, экологии и автоматизации химических, пищевых и металлургических производств: Материалы научно-практической конференции. – Иркутск: ИрГТУ, 2008. С. 272 – 274.
10. Гамбург Ю.Д. Гальванические покрытия. Справочник по применению. – М.: Техносфера, 2006. – 216 с.

Поступила 5 февраля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. VOL. 58. NO. 5, PP. 335–340.

## METALMATRIX PROTECTIVE COATINGS WITH NANOCOMPONENTS: FORMATION, PROPERTIES, APPLICATION

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

(kafcmet@sibsiu.ru)

**Rudneva V.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Non-ferrous metallurgy and chemical engineering”**

**Garbuzova A.K., Postgraduate of the Chair “Non-ferrous metallurgy and chemical engineering”**

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

**Abstract.** Electrodeposition conditions, structure and physicochemical properties (microhardness, coupling with a basis, internal tension, wear resistance, corrosion currents) of metalmatrix composite cover-

ings on the basis of nickel with nanopowder (NP) of titanium carbide (dimensional range (0.02 – 0.08 microns)) and its micropowder (MT) (1 – 5 micron) were investigated. It was established that at electrodeposition of nickel from electrolyte – suspension metal nickel at first is besieged on the nanoparticles weighed in electrolyte then nanoparticles are strongly attached to a substrate, easily and evenly grow into a deposit. Unlike micropowder, nanopowder of carbide is not only a filler, and acts as a strong structure-forming agent in the course of electrocrystallization of nickel and provides its mass multigerminial character that leads to formation of coverings with small sizes of structural fragments, characteristic opaque color, almost pore-free with the increased physicochemical properties. The coverings contained, %: Ni – 97.39; O – 1.79; Ti – 0.65; C – 0.17. Annealing of coverings in vacuum promotes increased their coupling with a basis in 1.3 times, microhardness - in 1.2 times, wear resistance in 1.3 times. Therefore the Ni – NP TiC covering can be recommended for anticorrosive pro-

tection and hardening of the details working very hard at average district speeds and low specific loadings.

**Keywords:** nickel, titanium carbide, nanopowder, micropowder, composite coating, electrolyte – suspension, electrodeposition conditions, structure, physicomechanical properties.

**DOI:** 10.15825/0368-0797-2015-5-335-340

#### REFERENCES

1. Saifullin R.S. Researches in the sphere of creation of composite electrochemical coatings (CEC) with dispersed phase of micro- and nanoparticles. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2009, no. 6, pp. 80–90. (In Russ.).
2. Desyatkov G.I., Yagodkina L.M., Savochkina I.E., Khaldeev G.V. Composite electrochemical coatings based on nickel. *Zashchita metallov*. 2002, Vol. 38, no. 5, pp. 525–529. (In Russ.).
3. Tsupak T.E. *Vysokoproizvoditel'nye protsessy elektroosazhdeniya nikelya i splava nikel' – fosfor iz elektrolitov, soderzhashchikh karbonovye kisloty* [High-performance processes of electrodeposition conditions of nickel and nickel – phosphorus alloy from the electrolytes containing carboxylic acids]: Dr. Chem. Sci. diss. Moscow, 2008. 40 p. (In Russ.).
4. Dolmatov V.Yu. Modern industrial detonating nanodiamond technologies (ND) and the main field of their usage. In: *Nanotekhnologii – proizvodstvu – 2006: Trudy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Nanotechnologies – for production – 2006: Proceedings of the International scientific and practical conference] Moscow: Yanus-K, 2006, pp. 113–151. (In Russ.).
5. Shiryayeva L.S., Nozdrin I.V., Galevskii G.V., Rudneva V.V. The research of composite electrochemical coatings of nickel – chromium nanocarbonitrides. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*. 2014, no. 2, Vol. XXII, pp. 51–57. (In Russ.).
6. Rudneva V.V., Galevskii G.V. Peculiarities of electrodeposition conditions and features of composite coatings with nanocomponents. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2007, no. 3, pp. 39–43. (In Russ.).
7. Kolpak V.P. Supply with crystallizer tubes of Continuous Casting Machines at JSC «Zapsibmetcombinat». In: *4-aya Mezhdunarodnaya konferentsiya «Oborudovanie i tekhnologii termicheskoi obrabotki metallov i splavov»: Sb. dokladov* [The 4th International Conference “Equipment and technology of heat treatment of metals and alloys”: Reports]. Kharkiv: KhGU, 2003, pp. 58–60.
8. Sukhovol'skii S.V. Influence of chromium-nickel coatings of a crystallizer on the quality of continuous casting work pieces. In: *Aktual'nye problemy elektrometallurgii, svarki, kachestva. T. 1: Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. [Actual problems of electrometallurgy, welding, quality. Vol. 1: Proceedings of the International scientific and practical conference]. Novokuznetsk: SibGIU, 2006, pp. 142–144. (In Russ.).
9. Gamayunov I.G., Baranov A.N. Corrosion protection of steel bars in aluminum electrolyzers. In: *Perspektivy razvitiya tekhnologii, ekologii i avtomatizatsii khimicheskikh, pishchevykh i metallurgicheskikh proizvodstv: Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Perspectives of technology development, ecology and automation of chemical, food and metallurgical processing: Works of scientific-practical conference]. Irkutsk: IrGTU, 2008, pp. 272–274. (In Russ.).
10. Gamburg Yu.D. *Gal'vanicheskie pokrytiya. Spravochnik po primeneniyu* [Galvanic coatings. Usage reference book]. Moscow: Tekhnosfera, 2006. 216 p.

**Acknowledgements.** The work was performed in SibSIU in the frames of the designed part of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation no. 11.1531/2014/K.

Received February 5, 2015

УДК 621.793.184:621.762.8

## СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ КАРБИДОВОЛЬФРАМОВЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ\*

**Осколкова Т.Н.**, к.т.н., доцент, заместитель заведующего кафедрой обработки металлов давлением и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК (oskolko@kuz.ru)

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

**Аннотация.** Получены новые знания о влиянии циркония в составе ионно-плазменного покрытия (Ti, Zr)N, наносимого на сплав ВК10КС. Ионно-плазменное покрытие (Ti, Zr)N наносили на установке «Квант-6», используя отдельные катоды из титана и циркония из расчета 50 % Ti + 50 % Zr с применением азота в качестве реакционного газа. В этом случае два катода из титанового сплава расположены в камере установки друг против друга, а катод из циркониевого сплава – между ними. Установлено, что введение циркония в состав покрытия (Ti, Zr)N приводит к увеличению (на 23 %) нанотвердости до 38 500 МПа, модуля Юнга – на 67 %, который свидетельствует об увеличении энергии связей между атомами и прочности материала покрытия, а также к повышению износостойкости и снижению коэффициента трения покрытия до 0,07, удовлетворительной адгезионной прочности покрытия, т.е. в целом улучшает эксплуатационные характеристики всего твердого сплава.

**Ключевые слова:** твердый сплав, покрытие, нанотвердость, износостойкость, шероховатость, адгезия, структура, ионно-плазменное покрытие.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-341-345

Карбидовольфрамовые твердые сплавы остаются основным материалом при производстве режущего, бурового, горно-режущего, штампового инструментов. Одной из причин образования дефектов, возникающих в рабочем слое вставки из твердого сплава, является абразивный износ поверхности [1].

Анализ специальной технической литературы свидетельствует об интенсивной работе многих ученых и фирм-изготовителей в направлении нанесения покрытий на твердые сплавы группы ВК с целью повышения твердости, износостойкости, уменьшения коэффициента трения, увеличения трещиностойкости и в целом повышения долговечности инструмента [2 – 6]. Выявлено, что основным наносимым покрытием является ионно-плазменное покрытие из нитрида титана, обладающее высокими температурой плавления и твердостью. Толщина покрытий колеблется от 3 до 20 мкм [7 – 10]. Однако при высоких скоростях эксплуатации происходит резкое снижение защитных свойств этих покрытий из-за невысокой теплостойкости. В этой связи в рамках настоящей работы с целью исключения отрицательного влияния высоких температур на твердый сплав ВК10КС при повышении скорости эксплуатации предлагается в состав ионно-плазменного покрытия TiN дополнительно ввести цирконий из расчета 50 % Ti + 50 % Zr [11].

Ионно-плазменное покрытие состава (Ti, Zr)N наносили на установке «Квант-6» производства ОАО «Научно-производственное предприятие космического при-

боростроения «Квант», используя отдельные катоды из титана и циркония с применением азота в качестве реакционного газа. В этом случае два катода из титанового сплава расположены в камере установки друг против друга, а катод из циркониевого сплава – между ними.

Исследование особенностей структуры твердого сплава ВК10КС после нанесения ионно-плазменного покрытия осуществляли с помощью растрового электронного микроскопа «Philips XL-30». Исследования поперечных шлифов (рис. 1) показали, что нанесенные ионно-плазменные покрытия (Ti, Zr)N толщиной 15 мкм на твердосплавные пластины ВК10КС не приводят к образованию микротрещин как в самом покры-

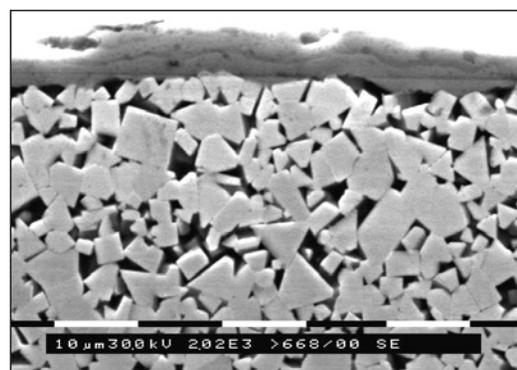


Рис. 1. Микроструктура твердого сплава ВК10КС с ионно-плазменным покрытием (Ti, Zr)N

Fig. 1. Microstructure of VK10KS hard alloy with ion-plasma (Ti, Zr)N coating

\* Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания Минобрнауки России № 11.153.2014/К.

тии, так и на его границе с основой сплава. Выявлена выраженная микрослоистость покрытия, связанная с технологией его нанесения из отдельных катодов. Наличие двух фаз TiN и ZrN подтверждает микрослоистость (рис. 2).

Распределение элементов в сплаве с покрытием (Ti, Zr)N представлено на рис. 3. Несмотря на микрослоистость структуры покрытия, можно наблюдать равномерное распределение элементов в покрытии без образования микропор между слоями.

В результате наноиндентирования твердого сплава с ионно-плазменным покрытием (Ti, Zr)N установлено, что оно является сверхтвердым с нанотвердостью 38 500 МПа.

Ниже представлены результаты механических свойств износостойких ионно-плазменных покрытий TiN и (Ti, Zr)N (данные для покрытия TiN взяты из работы [3]):

Характеристика	Значение характеристики для покрытия	
	TiN	(Ti, Zr)N
Нанотвердость, МПа	31 450	38 499
Модуль Юнга (E), ГПа	307,00	511,67

Как видно, введение легирующего элемента (циркония) в состав покрытия TiN приводит к существенному изменению его механических свойств: нанотвердость увеличивается на 23 %, величина E – на 67 %. Рост значений модуля Юнга свидетельствует о повышении энергии связей между атомами и, следовательно, прочности материала покрытия.

Трибологические испытания образцов с ионно-плазменными покрытиями (Ti, Zr)N проводили с помощью высокотемпературного трибометра «PC-Operated High Temperature Tribometer» при комнатной температуре. Износ образцов с покрытием определяли путем измере-

ния глубины и площади трека после испытаний, образованного в результате действия неподвижного алмазного индентора на вращающийся образец при нагрузке 3 Н, числе оборотов 12 000, линейной скорости движения 2,5 см/с. Для сравнения аналогичные испытания проводили на исходных образцах при таких же параметрах, но количестве оборотов 4000 (меньше в 3 раза) (рис. 4).

Измерение глубины и площади трека износа, а также коэффициента трения после испытаний на измерительной установке «High Temperature Tribometer» произведено с помощью высокоточного измерительного оборудования «Micro Measure 3D station» с программным обеспечением. Анализ полученных профилей произведен с использованием компьютерной программы Mountains Map Universal (версия 2.0.13).

Трибологические испытания образцов с ионно-плазменным покрытием показали, что глубина трека износа у сплава VK10КС составляет 76,6 нм, а у исходного образца – 58 мкм. Площадь сечения трека изношенных образцов с покрытием на сплаве VK10КС составляет 4,2 мкм<sup>2</sup>, на сплаве без покрытия – 12 921 мкм<sup>2</sup>. Коэффициент  $\mu$  трения сплава VK10КС с ионно-плаз-

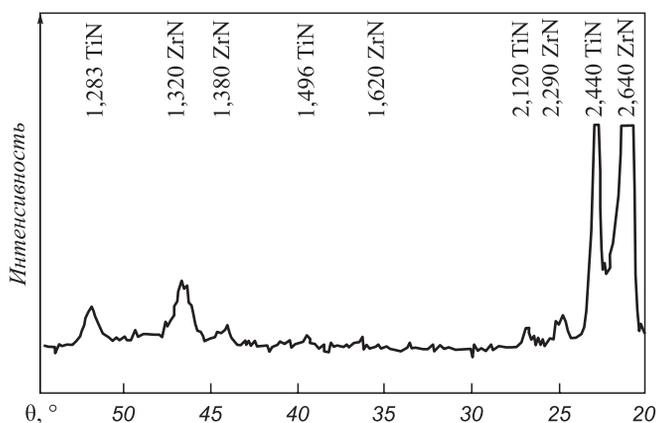


Рис. 2. Фрагмент дифрактограммы сплава VK10КС с ионно-плазменным покрытием (Ti, Zr)N

Fig. 2. Fragment of diffraction pattern of VK10KS alloy with ion-plasma (Ti, Zr)N coating



Рис. 3. Микроструктура,  $\times 1000$ , сплава VK10КС с ионно-плазменным покрытием (Ti, Zr)N в характеристических рентгеновских излучениях титана (а), циркония (б)

Fig. 3. Microstructure,  $\times 1000$ , of VK10KS alloy with ion-plasma (Ti, Zr)N coating in distinctive X-rays titanium (a), zirconium (b)

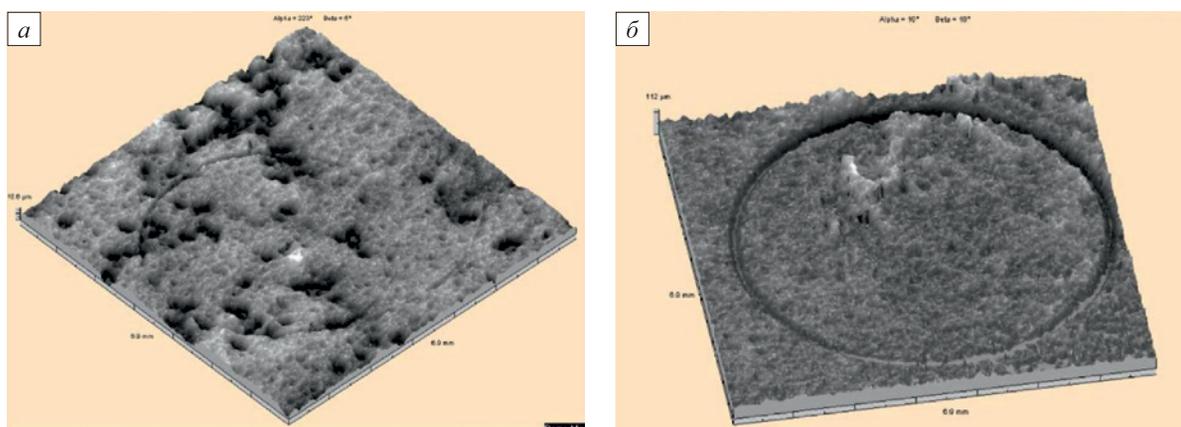


Рис. 4. Внешний вид треков при трибологических испытаниях:  
 а – сплав ВК10КС с ионно-плазменным покрытием (Ti, Zr)N; б – исходный сплав

Fig. 4. Appearance of tracks when they are tribologically tested:  
 а – VK10KS alloy with ion-plasma (Ti, Zr)N coating; б – original alloy

менными покрытиями (Ti, Zr)N после приработки устанавливается на значении 0,067 по сравнению с коэффициентом трения исходного образца, равном 0,41.

Известно, что инструмент с большей шероховатостью эксплуатируется небольшой срок, поэтому при конструировании детали задается допустимая микрогеометрия ее поверхности, обеспечивающая длительную ее работоспособность. В этой связи, в настоящей работе изучали микрогеометрию поверхности твердого сплава после нанесения ионно-плазменного покрытия (Ti, Zr)N методом профилометрии на установке «Micro Measure 3D station», которая является высокоточной измерительной установкой для получения 3D-микрофотографий высокого разрешения и используется для измерения геометрических линейных величин, из которых формируются профили и топологии поверхности исследуемого образца (рис. 5). Профилометрические исследования показали, что ионно-плазменное покрытие улучшает качество поверхности образцов [12]. Шероховатость поверхности исходного образца составляет  $R_a = 1,32$  мкм. После нанесения ионно-плазменного покрытия (Ti, Zr)N на твердый сплав ВК10КС шероховатость поверхности образца составляет 0,97 мкм.

Покрытие только тогда будет полностью выполнять свои функции, когда будет существовать высокая прочность сцепления его с материалом подложки.

Одной из основных характеристик получаемых тонких твердых покрытий является адгезия, которая определяет прочность контакта образовавшегося соединения покрытия с подложкой. Предполагается, что прочность сцепления во многом зависит от энергии падающей на подложку частицы: чем выше энергия, тем лучше адгезионная прочность. При ионно-плазменном распылении за счет полученного от иона импульса выбитые атомы пересекают разрядный промежуток и осаждаются на подложку, причем энергия, с которой они подходят к подложке, существенно больше, чем,

например, при методе термического вакуумного напыления [13], поэтому можно предположить, что адгезия ионно-плазменных покрытий с подложкой из твердого сплава будет удовлетворительной.

Адгезионные характеристики ионно-плазменного покрытия (Ti, Zr)N на карбидовольфрамовом твердом сплаве ВК10КС изучали с помощью установки Micro Scratch Tester (MST).

В измерительной установке MST для определения адгезионных свойств покрытий реализуется методика «царапания». На поверхности исследуемой системы (покрытие–подложка) алмазным индентором с пос-

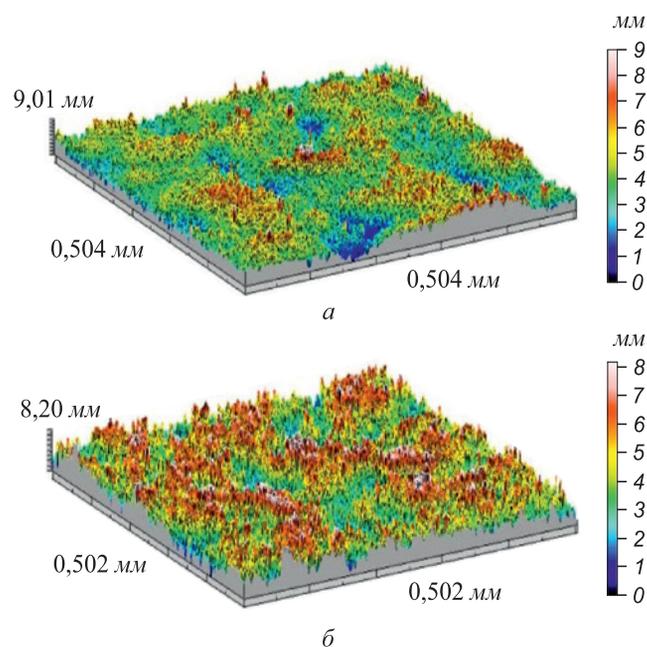


Рис. 5. Микрогеометрия сплава ВК10КС:  
 а – с покрытием (Ti, Zr)N; б – исходный образец

Fig. 5. Microgeometry of VK10KS alloy:  
 а – with (Ti, Zr)N coating; б – original alloy

тоянной скоростью наносится царапина. Причем, во время процесса на индентор действует линейно-возрастающая сила нагружения. Характеристикой адгезионной прочности выступает сила нагружения в момент начала отслаивания покрытия, которая определяется очень точно при помощи акустического датчика, датчиков тангенциальной нагрузки и глубины проникновения, нормальной нагрузки и изображений встроенного оптического микроскопа.

В рамках настоящей работы испытания на адгезионную прочность ионно-плазменного покрытия (Ti, Zr)N на примере сплава BK10KC проводили на измерительной установке Micro Scratch Tester с использованием качающегося модуля при соблюдении следующих режимов: скорость движения алмазного индентора – 7,97 мм/мин при постоянно растущей нагрузке, начиная с первоначальных значений 0,1 до 150,0 Н; уровень сигнала с датчика акустической эмиссии – 9; длина царапины – 8 мм.

По данным теста при нормальном нагружении 22,3 Н начинает образовываться царапина на покрытии. При дальнейшем увеличении нагрузки до 46,8 Н наблюдается увеличение ширины царапины. При значении 56,6 Н выявлен одновременный внезапный скачок сигналов акустической эмиссии и силы трения. Это значение является критическим, поскольку соответствуют моменту начала отслоения покрытия.

В целом, адгезию ионно-плазменного покрытия (Ti, Zr)N с твердосплавной подложкой можно считать достаточно высокой, исходя из следующих позиций. Известно, что повышение твердости материала ведет к снижению его пластичности. Отсюда следовало ожидать, что увеличение твердости покрытий (Ti, Zr)N при повышении содержания легирующего компонента (циркония) должно способствовать повышению площади отслоения покрытий при индентировании и, следовательно, приводить к увеличению отслоения покрытия в целом. В действительности высокая адгезия (снижение отслоения) ионно-плазменного покрытия (Ti, Zr)N с твердосплавной подложкой объясняется наличием в покрытиях, полученных из отдельных электродов, слоистости. Граница между микрослоями покрытия тормозит рост трещины, образовавшейся при внедрении в него индентора, что способствует снижению отслоения покрытия и, следовательно, повышает его трещиностойкость.

**Выводы.** Изучено структурообразование ионно-плазменного покрытия (Ti, Zr)N, нанесенного из отдельных катодов титана и циркония на твердый сплав BK10KC при содержании циркония и титана в покры-

тии по 50 %. Наличие двух фаз TiN и ZrN в покрытии свидетельствует о микрослоистости его структуры, которая, несмотря на высокую (38 500 МПа) нанотвердость этих покрытий, сдерживает в нем процессы трещинообразования и отслоения от основы. Установлено, что введение циркония в состав покрытия (Ti, Zr)N приводит к увеличению (на 23 %) нанотвердости до 38 500 МПа, модуля Юнга – на 67 %, а также к снижению коэффициента трения покрытия до 0,07.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панов В.С., Чувилин А.М., Фальковский В.А. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. – М.: МИСиС, 2004. – 464 с.
2. Осколкова Т.Н. Покрытия на карбидовольфрамовых твердых сплавах с повышенной твердостью // Изв. вуз. Черная металлургия. 2010. № 6. С. 53 – 55.
3. Верещака А.С. Некоторые методологические принципы создания функциональных покрытий для режущих инструментов. – В кн.: Современные технологии в машиностроении. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. С. 210 – 231.
4. Пат. 2211879 РФ. Способ получения твердосплавного инструмента / В.С. Фадеев, Ю.Л. Чигрин, Б.Я. Мокрицкий, А.В. Конаков; опубл. 10.09.2003, бюл. № 25.
5. Пат. 6756111 США. Покрытый твердый сплав / Okada Yoshin, Moriguchi Hideki, Ikegaya Akihiko; Sumitomo Electric Ind. Ltd; опубл. 29.06.2004.
6. Костюк Г.И. Физические процессы плазменно-ионных, ионно-лучевых, плазменных, светолучевых и комбинированных технологий. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения комбинированных технологий. – Киев: Изд-во АИНУ, 2002. – 587 с.
7. Пат. 2087258 РФ. Материал для покрытия на металлорежущий и штамповый инструмент из стали и твердого сплава / Б.С. Хомяк; опубл. 20.08.1997; бюл. № 23.
8. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 2008. – 311 с.
9. Верещака А.С., Верещака А.А. Повышение эффективности инструмента путем управления составом, структурой и свойствами покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 9. С. 9 – 18.
10. Бобров Г.В., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий (теория, технология, оборудование). – М.: Изд-во Интермет Инжиниринг, 2004. – 624 с.
11. Осколкова Т.Н. Твердый сплав на основе карбида вольфрама с ионно-плазменным TiZrN покрытием // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12. № 1 (2). С. 476 – 478; Карбидовольфрамовый твердый сплав с износостойким покрытием. 2013. Т. 15. № 4 (2). С. 473 – 475.
12. Осколкова Т.Н. Влияние способов нанесения покрытий на шероховатость WC – Co твердого сплава // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 10. С. 15 – 19.
13. Марголин В.И., Жабреев В.А., Тупик В.А. Физические основы микроэлектроники. – М.: Академия, 2008. – 400 с.

Поступила 28 января 2015 г.

## THE WAYS OF INCREASING WEAR RESISTANCE ABILITY OF WC – Co HARD ALLOY

**Oskolkova T.N.**, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Deputy Head of the Chair “Metal Forming and Metal Science. OJSC “EVRAZ ZSMK”* (oskolkova@kuz.ru)

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

**Abstract.** The paper presents the new knowledge about influence of zirconium as an ingredient of ionic-plasma (Ti, Zr)N coating which was spread on VK10 KS alloy. Ionic-plasma (Ti, Zr)N coating was spread with the use of “Kvant-6” equipment and separate cathodes made from 50 % Ti + 50 % Zr. N<sub>2</sub> was used as a reaction gas. In this case two cathodes made from TiN were situated in the chamber of the equipment one against another but the cathode made from ZrN was between them. It was found out that introduction of zirconium into composition of the coating leads to increase of nanohardness as much as 23 % up to 38 500 MPa and Young’s modulus – as much as 67 %, which characterizes the increase of energy of atomic bonds and materials strength. Also it leads to increase of antifriction ability and decrease of friction constant of coating up to  $\mu = 0.07$ , satisfactory adhesive strength of coating, i.e. generally improves the service features of the whole alloy.

**Keywords:** hard alloy, coating, nanohardness, antifriction ability, roughness, adhesion, structure, ionic-plasma coating.

**DOI:** 10.15825/0368-0797-2015-5-341-345

## REFERENCES

1. Panov V.S., Chuvilin A.M., Fal’kovskii V.A. *Tekhnologiya i svoystva spechennykh tverdykh splavov i izdelii iz nikh* [Technology and properties of sintered hard alloys and items made from them]. Moscow: MISiS, 2004. 464 p. (In Russ.).
2. Oskolkova T.N. Coatings based on WC – Co hard alloys with the increased hardness. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 6. pp. 53–55. (In Russ.).
3. Vereshchaka A.S. Some methodological principles of the creation of functional coatings for cutting instruments. In.: *Sovremennye tekhnologii v mashinostroenii* [Modern technologies in machine-building industry]. Kharkov: NTU «KhPI», 2007, pp. 210–231.
4. Fadeev V.S., Chigrin Yu.L., Mokritskii B.Ya., Konakov A.V. *Sposob polucheniya tverdospлавного instrumenta* [Way of production of hard-alloy instruments]. Patent RF no. 2211879, *Byul. Izobretenii* no. 25, 2003. (In Russ.).
5. Okada Yoshin, Moriguchi Hideki, Ikegaya Akihiko; Sumitomo Electric Ind. Ltd. *Coated hard alloy*. Patent US 6756111, Published Jun 29, 2004.
6. Kostyuk G.I. *Fizicheskie protsessy plazmenno-ionnykh, ionno-luchevykh, plazmennyykh, svetoluchevykh i kombinirovannykh tekhnologii. Fiziko-tekhnicheskie osnovy naneseniya pokrytii, ionnoi implantatsii i ionnogo legirovaniya, lazernoi obrabotki i uprochneniya kombinirovannykh tekhnologii* [Physical processes of plasma-ion, ion-beam, plasma, light-beam and mixed technologies. Physicotechnical bases of coating, ion implantation and ion alloying, laser treatment and hardening of mixed technologies] Kiev: Izd-vo AINU, 2002. 587 p. (In Russ.).
7. Khomyak B.S. *Material dlya pokrytiya na metallorezhushchii i shtampovyi instrument iz stali i tverdogo splava* [Coating material for metal-cutting and punching tools of steel and hard alloys]. Patent RF no. 2087258, *Byul. Izobretenii* no. 23, 1997. (In Russ.).
8. Tabakov V.P. *Formirovanie iznosostoikikh ionno-plazmennyykh pokrytii rezhushchego instrumenta* [Formation of wear-resistant ion-plasma coatings of cutting instruments]. Moscow: Mashinostroenie, 2008. 311 p. (In Russ.).
9. Vereshchaka A.S., Vereshchaka A.A. Effectiveness increase of the instrument by controlling the composition, structure and properties of coatings. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2005, no. 9, pp. 9–18. (In Russ.).
10. Bobrov G.V., Il’in A.A. *Nanesenie neorganicheskikh pokrytii (teoriya, tekhnologiya, oborudovanie)* [Inorganic coatings (theory, technology, equipment)]. Moscow: Izd-vo Internet Inzhiniring, 2004. 624 p. (In Russ.).
11. Oskolkova T.N. Hard alloys based on tungsten carbide with ion-plasma TiZrN coating. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2010. Vol. 12, no. 1 (2), pp. 476–478; Tungsten carbide hard alloy with wear-resistant coating. 2013. Vol. 15, no. 4 (2), pp. 473–475. (In Russ.).
12. Oskolkova T.N. Influence of coating ways on roughness of WC – Co hard alloy. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2011, no. 10, pp. 15–19. (In Russ.).
13. Margolin V.I., Zhabreev V.A., Tupik V.A. *Fizicheskie osnovy mikroelektroniki* [Physical properties of microelectronics]. Moscow: Akademiya, 2008. 400 p. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was performed in the frames of the designed part of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation no. 11.1531/2014/K.

Received January 28, 2015

## СТРУКТУРНО-МАСШТАБНЫЕ УРОВНИ УВЕЛИЧЕНИЯ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКОЙ\*

**Громов В.Е.<sup>1</sup>**, д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой физики им. В.М. Финкеля (gromov@physics.sibsiu.ru)

**Воробьев С.В.<sup>1</sup>**, к.т.н., соискатель ученой степени доктора наук кафедры физики им. В.М. Финкеля

**Сизов В.В.<sup>1</sup>**, к.т.н., инженер кафедры физики им. В.М. Финкеля

**Коновалов С.В.<sup>1</sup>**, д.т.н., доцент, профессор кафедры физики им. В.М. Финкеля

**Иванов Ю.Ф.<sup>2,3</sup>**, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник

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

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

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет  
(634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 50)

**Аннотация.** Электронно-пучковая обработка (с параметрами: плотность энергии пучка электронов 10 – 40 Дж/см<sup>2</sup>, длительность импульса 50 – 150 мкс, число импульсов 3 – 5, частота следования 0,3 с<sup>-1</sup>) сталей различных структурных классов (08X18H10T, 20X23H18, 20X13, Э76Ф) и силумина приводит к увеличению числа циклов до разрушения примерно в 3,5 раза. Методами растровой и просвечивающей электронной дифракционной микроскопии проведены исследования структурно-фазовых состояний и дефектной субструктуры этих материалов. Увеличение усталостной долговечности стали обусловлено преобразованием структуры поверхностного слоя материала, происходящим при облучении образцов высокоинтенсивным импульсным электронным пучком. Высказано предположение, что физический смысл влияния многоуровневого структурно-фазового состояния на механические свойства поверхностного слоя материала состоит в перераспределении упругой энергии как за счет взаимодействия упругих полей структурных элементов различного масштабного уровня, так и за счет снижения масштабного уровня локализации пластической деформации.

**Ключевые слова:** структурно-фазовые состояния, усталость, ресурс, электронно-пучковая обработка, сталь, силумин, растровая и просвечивающая электронная микроскопия.

**DOI:** 10.15825/0368-0797-2015-5-346-351

Одним из перспективных способов модифицирования структуры поверхностного слоя изделий из различных материалов является электронно-лучевая импульсная обработка [1]. По сравнению с другими методами с использованием концентрированных потоков энергии, этот вид обработки обладает большими возможностями контроля и регулирования количества подводимой энергии, отличается локальностью распределения энергии в поверхностном слое обрабатываемого материала и высоким коэффициентом полезного действия. Сверхвысокие скорости нагрева до температур плавления и последующего охлаждения тонкого поверхностного слоя материала, весьма малое время воздействия высоких температур обеспечивают существенные изме-

нения структурно-фазового состояния поверхностных слоев, приводят к значительному улучшению физико-химических и прочностных свойств материалов, недостижимому при традиционных методах поверхностной обработки [2 – 10].

Цель настоящей работы – выявление и анализ физических факторов, ответственных за повышение многоциклового усталостной долговечности сталей и сплавов, подвергнутых облучению высокоинтенсивным низкоэнергетическим импульсным электронным пучком.

В качестве материала исследования использовали стали различных структурных классов (аустенитные – стали 08X18H10T и 20X23H18, перлитную – сталь Э76Ф, мартенситную – сталь 20X13) и силумин (Al–12Si). Выбранные для исследования материалы относятся к многофазным. Аустенитные стали 08X18H10T и 20X23H18, образцы из которых подвергали нагреву до 1423 К в течение 2 ч с последующим охлаждением на воздухе, содержат частицы карбидной фазы типа  $Me_2C_6$  глобулярной формы. Рельсовая сталь Э76Ф, образцы из которой подвергали нагреву

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых кандидатов наук МК-4166.2015.2 и докторов наук МД-2920.2015.8, РФФИ в рамках научных проектов № 13-02-12009 офи\_м, 15-08-03411, 14-08-00506а, госзаданий Минобрнауки № 2708 и 3.1496.2014/К на выполнение научно-исследовательской работы.

до 1173 К в течение 2 ч с последующим охлаждением с печью, имеет перлитную (преимущественно пластинчатой морфологии) структуру. Образцы из стали 20X13 подвергали отжигу при 1253 К при выдержке в течение 3 ч и закалке в масле, структура этих образцов – мартенсит с расположенными по границам зерен частицами карбидной фазы состава  $Me_{23}C_6$  субмикронных размеров.

Усталостные испытания проводили на специальной установке по схеме циклического асимметричного консольного изгиба. Напряжение циклической нагрузки 15 – 20 МПа, частота нагружения 20 Гц, температура испытания 296 К. При испытаниях определяли число циклов до полного разрушения образцов размерами  $8 \times 15 \times 145$  мм с концентраторами напряжений в виде полукруглого выреза радиусом 10 мм.

Модификацию поверхностного слоя образцов стали и силумина, подготовленных для усталостных испытаний, осуществляли низкоэнергетическим высокоинтенсивным электронным пучком на установке СОЛО (ИСЭ СО РАН, г. Томск) [11]. Режим электронно-пучковой обработки: энергия электронов ( $e_U$ ) 18 кэВ; длительность импульса воздействия пучка электронов ( $\tau$ ) 50 и 150 мкс; количество импульсов воздействия ( $N$ ) 3 – 5; частота следования импульсов ( $f$ )  $0,3 \text{ с}^{-1}$ ; плотность энергии пучка электронов ( $E_S$ ) 10 – 40 Дж/см<sup>2</sup>.

Исследования фазового состава и состояния дефектной субструктуры стали осуществляли на различных расстояниях от поверхности облучения методами просвечивающей дифракционной (метод тонких фольг) электронной микроскопии [12, 13]. Для идентификации фаз применяли микродифракционный анализ с использованием темнопольной методики и последующего индицирования микроэлектроннограмм. Морфологию поверхности облучения и поверхность разрушения образцов исследовали методами сканирующей электронной микроскопии [14].

Выполнено облучение, проведены испытания и выявлены оптимальные режимы воздействия высокоинтенсивного импульсного электронного пучка, позволяющие многократно (до 3,5 крат) повысить усталостную долговечность образцов стали 08X18H10T, 20X23H18, Э76Ф, 20X13 и силумина [15 – 19]. Материалы и режимы обработки, обеспечивающие максимальное увеличение усталостной долговечности (число циклов до разрушения стали без ЭПО ( $n$ ), максимальное увеличение числа циклов до разрушения после ЭПО ( $\Delta N$ )) приведены ниже:

Сплав	$E_S$ , Дж/см <sup>2</sup>	$n \cdot 10^{-5}$	$\Delta N$ , крат
08X18H10T	25	1,8	3,5
20X23H18	20	1,5	2,1
Э76Ф	20	2,2	2,5
20X13	30	1,5	1,8
Силумин	20	1,3	3,5

Очевидно, что увеличение усталостной долговечности стали обусловлено преобразованием структуры поверхностного слоя материала, имеющем место при облучении образцов высокоинтенсивным импульсным электронным пучком. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

**Сталь 08X18H10T** в исходном состоянии является поликристаллическим агрегатом со средним размером зерен 14,6 мкм (размер реальных зерен в стали изменяется в пределах 1,0 – 86,4 мкм). В объеме зерен присутствуют микродвойники. В пространстве между двойниками располагаются дислокации, распределенные хаотически либо формирующие сетчатую субструктуру. Скалярная плотность дислокаций  $\langle \rho \rangle \approx 4,75 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Фазовый состав стали характеризуется наличием частиц карбида типа  $Me_{23}C_6$  (частицы карбида на основе хрома состава  $(Cr, Fe)_{23}C_6$ ). Частицы глобулярной формы распределены хаотически в объеме зерен и расположены в стыках границ зерен. Средний размер частиц 167 нм (размер реальных частиц изменяется в пределах 30 – 430 нм). Частицы, располагающиеся вдоль границ зерен, имеют форму прослоек. В отдельных случаях наблюдаются протяженные строчки частиц (строчки дендритной ликвации).

Электронно-пучковая обработка стали [15] при оптимальном режиме (по отношению к усталостной долговечности стали) облучения ( $e_U = 18$  кэВ,  $E_S = 25$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\tau = 50$  мкс,  $f = 0,3 \text{ с}^{-1}$ ,  $N = 3$  имп.) сопровождается существенным (в 1,5 – 2,0 раза) снижением среднего размера зерен. Высокоскоростная кристаллизация расплавленного поверхностного слоя (толщиной до 10 мкм) протекает путем формирования ячеистой структуры.

Средние размеры ячеек кристаллизации составляют  $320 \pm 93$  нм (размер реальных ячеек изменяется в пределах 150 – 600 нм). В объеме ячеек кристаллизации наблюдается дислокационная субструктура в виде хаотически распределенных дислокаций; скалярная плотность дислокаций  $3,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Микродвойники в ячейках кристаллизации не выявлены.

Вдоль границ ячеек кристаллизации располагаются частицы второй фазы. Индицирование микроэлектроннограммы, полученной с ячеистой структуры, выявило присутствие рефлексов карбида титана состава  $TiC$  и рефлексов соединения  $Cr_{13}Fe_9$ . Частицы имеют округлую форму, размеры частиц изменяются в пределах 20 – 45 нм.

Таким образом, электронно-пучковая обработка стали 08X18H10T сопровождается существенным преобразованием структуры поверхностного слоя, заключающемся в существенном уменьшении размера зерен; в полном растворении частиц исходной карбидной фазы; в формировании ячеек дендритной кристаллизации; в выделении наноразмерных частиц второй фазы по границам ячеек кристаллизации.

**Аустенитная сталь 20X23H18** в исходном состоянии является поликристаллическим агрегатом, средний

размер зерен которого 41,4 мкм (размеры реальных зерен изменяются в пределах 11,4 – 88,7 мкм). Характерным элементом зеренной структуры стали в исходном состоянии являются микродвойники. Вдоль границ зерен (в виде протяженных прослоек), реже в объеме зерен (в виде частиц округлой формы) выявляются частицы второй фазы состава  $(\text{Fe}, \text{Cr})_{23}\text{C}_6$ . Поперечные и продольные размеры частиц, расположенных вдоль границ зерен, изменяются в пределах 40 – 100 нм и 0,2 – 1,0 мкм соответственно.

Электронно-пучковая обработка стали 20X23N18 [16] при оптимальном режиме (по отношению к усталостной долговечности стали) облучения ( $e_U = 18$  кэВ,  $E_S = 20$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\tau = 50$  мкс,  $f = 0,3$  с<sup>-1</sup>,  $N = 3$  имп.) сопровождается снижением среднего размера зерен до 21,3 мкм. Высокоскоростная кристаллизация расплавленного поверхностного слоя (толщиной до 5 мкм) протекает путем формирования ячеистой структуры. Размеры ячеек изменяются в пределах 200 – 600 нм при среднем размере 400 нм. В ячейках наблюдается дислокационная субструктура в виде хаотически распределенных дислокаций или дислокационных сеток; скалярная плотность дислокаций  $3,2 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup>. Плавление поверхностного слоя сопровождается полным растворением частиц карбида типа  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$ , присутствующих в стали в исходном состоянии. Последующая скоростная кристаллизация приводит к повторному выделению частиц второй фазы. Частицы имеют округлую форму; размеры частиц изменяются в пределах 20 – 40 нм. Индентирование микроэлектроннограмм, полученных с объема материала, содержащего выделение второй фазы, позволяет утверждать, что данные частицы являются карбидом на основе хрома состава  $(\text{Cr}, \text{Fe})_{23}\text{C}_6$ .

Увеличение усталостной долговечности стали 20X23N18 связано с существенным преобразованием структуры поверхностного слоя при электронно-пучковой обработке. Выявлены полное растворение частиц исходной карбидной фазы; формирование ячеек дендритной кристаллизации; выделение наноразмерных частиц второй фазы по границам ячеек кристаллизации; существенное (примерно в 2,3 раза) измельчение зеренной структуры стали вследствие протекания процесса динамической рекристаллизации, инициированного высоким уровнем напряжений, которые возникают в материале при высокоскоростном охлаждении.

Термическая обработка рельсовой стали Э76Ф (нагрев до 1173 К в течение 2 ч с последующим охлаждением с печью) привела к образованию поликристаллической структуры, представленной зернами перлита преимущественно пластинчатой морфологии и, в незначительном количестве, зернами структурно свободного феррита.

Электронно-пучковая обработка стали Э76Ф [17] при оптимальном режиме (по отношению к усталостной долговечности стали) облучения ( $e_U = 18$  кэВ,  $E_S = 20$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\tau = 50$  мкс,  $f = 0,3$  с<sup>-1</sup>,  $N = 3$  имп.) со-

провождается снижением среднего размера зерен более, чем в два раза. Высокоскоростная кристаллизация расплавленного поверхностного слоя (толщиной до 5 – 7 мкм) протекает путем формирования ячеистой структуры. Размеры ячеек изменяются в пределах 200 – 500 нм при среднем размере 350 нм. Скоростная закалка поверхностного слоя стали приводит к формированию многофазной структуры. Основной является  $\alpha$ -фаза, представленная мартенситом. Размеры пакетов изменяются в пределах 0,8 – 1,0 мкм; поперечные размеры кристаллов мартенсита – в пределах до 100 нм. Наряду с  $\alpha$ -фазой обнаруживаются остаточный аустенит, цементит и графит.

Таким образом, облучение стали Э76Ф высокоинтенсивным импульсным электронным пучком приводит к плавлению поверхностного слоя и последующей кристаллизации с формированием ячеистой структуры. Высокоскоростная закалка сопровождается  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращением с образованием наноразмерной мартенситной структуры.

Исходное состояние стали 20X13 формируется путем аустенитизации (температура аустенитизации 980 °С, время аустенитизации 3 ч) и последующей закалки в масле. Аустенитизация стали приводит к формированию поликристаллического агрегата, средние продольные и поперечные размеры зерен которого составляют 19,8 и 12,4 мкм соответственно. В результате термической обработки в стали 20X13 формируется мартенситная структура, особенностью которой является присутствие субмикронных частиц карбида типа  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$  округлой, реже глобулярной формы, расположенных в объеме и по границам зерен.

Электронно-пучковая обработка стали 20X13 [18] при оптимальном режиме (по отношению к усталостной долговечности стали) облучения ( $e_U = 18$  кэВ,  $E_S = 30$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\tau = 50$  мкс,  $f = 0,3$  с<sup>-1</sup>,  $N = 3$  имп.) сопровождается плавлением поверхностного слоя толщиной примерно 10 мкм, полным растворением субмикронных частиц карбида типа  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$ , присутствующих в стали в исходном состоянии. Высокоскоростная кристаллизация поверхностного слоя приводит к формированию структуры ячеистого типа со средним размером ячеек 250 нм (реальный размер ячеек изменяется в пределах 80 – 500 нм) при среднем размере зерен  $\alpha$ -фазы 3,8 мкм. Ячейки кристаллизации разделены прослойками второй фазы, толщина которых изменяется в пределах 20 – 40 нм. Частицы второй фазы обнаруживаются и в объеме ячеек. Индентирование микроэлектроннограмм, полученных с объема материала, содержащего частицы, позволило показать, что частицы являются карбидами хрома типа  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$  либо соединением состава  $\sigma\text{-FeCr}$ .

Таким образом, облучение стали 20X13 высокоинтенсивным импульсным электронным пучком приводит к растворению присутствующих в стали перед облучением глобулярных частиц карбида типа  $\text{Me}_{23}\text{C}_6$  субмикронных размеров, являющихся потенциально

опасными элементами структуры, которые способны вызвать преждевременное разрушение стали при ее усталостных испытаниях; к формированию структуры ячеистой кристаллизации; к существенному снижению среднего размера зерен.

**Силумин.** Микроструктура эвтектических силуминов в литом состоянии содержит алюмо-кремниевую эвтектику (Al + Si) и изолированные кристаллы первичного кремния пластинчатой формы, которые располагаются, как правило, хаотически в средней части дендритных ячеек (Al) либо декорируют границы зерен сплава. При облучении по режиму  $e_U = 18$  кэВ,  $E_S = 20$  Дж/см<sup>2</sup>,  $\tau = 150$  мкс,  $f = 0,3$  с<sup>-1</sup>,  $N = 5$  имп. формируется однородная структура зеренного типа (размер зерен эвтектики изменяется в пределах 30 – 50 мкм). Зерна разделены прослойками кремния, поперечные размеры которых не превышают 20 мкм. Пластины кремния, способные являться источниками разрушения силумина, при данном режиме облучения на кромке излома не обнаруживаются. По-видимому, концентраторы, являющиеся причиной разрушения образца, располагаются под поверхностью, скорее всего, на границе раздела жидкой и твердой фаз [19].

Обобщая представленные выше результаты, можно констатировать, что облучение сталей различных структурных классов (08X18H10T, 20X23H18, Э76Ф и 20X13) и силумина высокоинтенсивным импульсным электронным пучком в оптимальном режиме приводит к формированию в поверхностном слое многоуровневого (микро-, субмикро- и наноразмерные уровни) структурно-фазового состояния, характеризующегося относительно малым размером зерен (микромасштабный уровень), присутствием в объеме зерен ячеек высокоскоростной кристаллизации субмикронных размеров (субмикромасштабный уровень), границы которых стабилизированы наноразмерными выделениями частиц второй фазы (наномасштабный уровень) и уменьшению числа концентраторов напряжений, способных являться источниками субмикротрещин [15 – 19].

Формирование в поверхностном слое материала многоуровневого структурно-фазового состояния привело к кратному (до 3,5 крат) увеличению усталостной долговечности сталей и сплавов. Физический смысл влияния многоуровневого структурно-фазового состояния на механические свойства поверхностного слоя материала состоит в перераспределении упругой энергии как за счет взаимодействия упругих полей структурных элементов различного масштабного уровня, так и за счет снижения масштабного уровня локализации пластической деформации. Это приводит к более равномерному распределению упругих напряжений в поверхностном слое при внешнем механическом воздействии. В результате в значительной степени повышается энергия, необходимая для зарождения критических концентраторов напряжения, наблюдается существенное снижение скорости роста микротрещин,

улучшаются механические характеристики поверхностного слоя материала [20].

**Выводы.** Экспериментально установлено неизвестное ранее явление увеличения усталостной долговечности сталей и сплавов различных структурных классов электронно-пучковой обработкой, заключающееся в том, что при воздействии на поверхность стали низкоэнергетического высокоинтенсивного импульсного электронного пучка  $e_U = 18$  кэВ,  $\tau = 50 \div 150$  мкс,  $f = 0,3$  с<sup>-1</sup>,  $N = 3 \div 5$  имп. с плотностью энергии до 40 Дж/см<sup>2</sup> происходят закономерные изменения структуры, фазового состава и параметров дефектной субструктуры поверхностного слоя материала на разных масштабных уровнях (от микро- до nano-); подавление процессов, способствующих формированию областей, являющихся потенциальным местом образования субмикротрещин. Формирование в результате облучения поверхности материала низкоэнергетическим высокоинтенсивным электронным пучком многоуровневого (микро-, субмикро- и наноразмерные уровни) структурно-фазового состояния позволяет кратно (до 3,5 крат) повысить усталостную долговечность материалов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сильноточные импульсные электронные пучки для авиационного двигателестроения / А.Б. Белов, О.А. Быченко, А.В. Крайников и др. Под ред. А.С. Новикова, В.А. Шулова, В.И. Энгелько. – М.: Дипак, 2012. – 292 с.
2. Суржиков А.П., Франгулян Т.С., Гынгазов С.А., Мельников А.Г., Коваль Н.Н., Девятков В.Н. Модифицирование свойств циркониевой керамики сильноточным пучком низкоэнергетических электронов // Перспективные материалы. 2006. № 4. С. 58 – 64.
3. Курзина И.А., Козлов Э.В., Попова Н.А. и др. Модификация структурно-фазового состояния мелкозернистого титана в условиях ионного облучения // Известия РАН. Серия физическая. 2012. Т. 76. № 11. С. 1384.
4. Перетягко В.Н., Темлянцев М.В., Филиппова М.В. Развитие теории и практики металлургических технологий. Т. 2. Пластичность и разрушение стали в процессах нагрева и обработки давлением. – М.: Теплотехник, 2010. – 352 с.
5. Чернов И.П., Березнеева Е.В., Белоглазова П.А. и др. Физико-механические свойства модифицированной поверхности циркониевого сплава импульсным ионным пучком // Журнал технической физики. 2014. Т. 84. № 4. С. 68 – 72.
6. Marushchak P.O., Hlad'о V.B., Bishchak R.T., Pylypenko A.P. // Materials Science. 2010. Vol. 46. Iss. 1. P. 102 – 107.
7. Шулепов М.А., Ахмадеев Ю.Х., Тарасенко В.Ф. и др. Модификация поверхностных слоев меди при воздействии объемным разрядом, инициируемым пучком электронов лавин в азоте и СО<sub>2</sub> атмосферного давления // Изв. вузов. Физика. 2010. Т. 53. № 12. С. 63 – 66.
8. Белый А.В., Кукареко В.А., Таран И.И. и др. Формирование и свойства наноструктурных поверхностных слоев в аустенитных сталях, подвергнутых ионно-лучевому азотированию // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2006. № 7. С. 100 – 106.
9. Струц В.К., Ремнев Г.Е. Исследование воздействия импульсных мощных ионных пучков на инструментальную сталь Р6М5 // Изв. вузов. Физика. 2010. № 10/2. С. 125 – 128.
10. Панова Т.В., Ковивчак В.С., Блинов В.И. Рентгенографические исследования двухслойных систем, облученных мощным ион-

- ным пучком // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2008. № 8. С. 76 – 79.
11. Devyatkov V.N., Koval N.N., Schanin P.M., Grigoryev V.P., Koval T.B. // *Laser and Particle Beams*. 2003. Vol. 21. P. 243 – 248.
  12. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия в металлведении. – М.: Металлургия, 1973. – 584 с.
  13. Томас Г., Гориндж М.Дж. Просвечивающая электронная микроскопия материалов. – М.: Наука, 1983. – 320 с.
  14. Энгель Л., Клингеле Г. Растровая электронная микроскопия. Разрушение. Справочное изд. / Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1986. – 232 с.
  15. Иванов Ю.Ф., Коваль Н.Н., Горбунов С.В. и др. Многоцикловая усталость нержавеющей стали, обработанной высокоинтенсивным электронным пучком: структура поверхностного слоя // Изв. вузов. Физика. 2011. № 5. С. 61 – 69.
  16. Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Сизов В.В. и др. Увеличение усталостной долговечности нержавеющей стали электронно-пучковой обработкой поверхности // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013. № 1. С. 99 – 104.
  17. Гришунин В.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. и др. Эволюция фазового состава и дефектной субструктуры рельсовой стали, подвергнутой обработке высокоинтенсивным электронным пучком // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013. № 10. С. 82 – 88.
  18. Иванов Ю.Ф., Бессонов Д.А., Воробьев С.В. и др. Усталостная прочность закаленной стали 20Х13, подвергнутой электронно-пучковому модифицированию // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2013. № 1. С. 94 – 98.
  19. Иванов Ю.Ф., Алсараева К.В., Громов В.Е. и др. Повышение усталостного ресурса силумина при обработке высокоинтенсивным импульсным электронным пучком // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2014. Т. 11. № 3. С. 281 – 285.
  20. Панин В.Е., Гриняев Ю.В., Псахье С.Г. Физическая мезомеханика: достижения за два десятилетия развития, проблемы и перспективы // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7. Спец. вып. Ч. 1. С. 25 – 40.

Поступила 12 ноября 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 5, pp. 346–351.

## STRUCTURAL-SCALE LEVELS OF FATIGUE DURABILITY INCREASE OF STEELS AND ALLOYS BY ELECTRON-BEAM TREATMENT

**Gromov V.E.**<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Head of the Chair of physics named after V.M. Finkel

(gromov@physics.sibsiu.ru)

**Vorob'ev S.V.**<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Candidates for a degree of Dr. Sci. (Eng.) the Chair of physics named after V.M. Finkel

**Sizov V.V.**<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Engineer of the Chair "Physics" named after V.M. Finkel

**Konovalov S.V.**<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Professor of the Chair of physics named after V.M. Finkel

**Ivanov Yu.F.**<sup>2,3</sup>, Dr. Sci. (Phys.-math.), Professor, Chief Research Associate

<sup>1</sup> Siberian State Industrial University (42, Kirova str., Kemerovo region, Novokuznetsk, 654007, Russia)

<sup>2</sup> Institute of High Current Electronics SB RAS (2/3, Akademicheskii ave., Tomsk, 634055, Russia)

<sup>3</sup> National Research Tomsk State University (50, Lenina ave., Tomsk, 634050, Russia)

**Abstract.** The electron-beam treatment of different classes of steels (Fe–0.1C–18Cr–10Ni–1Ti, Fe–0.2C–23Cr–18Ni, Fe–0.2C–13Cr, Fe–0.76C–1V) and silumin (Al – 12 % Si) with the parameters: electron beam energy density 10 – 40 J/cm<sup>2</sup>, pulse duration 50 – 150 μs, pulse number 3 – 5, frequency 0.3 Hz) leads to the increase of cycle numbers up to the fracture in ~ 3.5 times. The studies of structure-phase states and defect substructure of these materials were carried out using the methods of scanning and transmission electron diffraction microscopy. It was shown that the increase in fatigue life of steel is due to the transformation of the structure of the surface layer of the material occurring during irradiation of samples high-intensity pulsed electron beam. It was suggested that the physical sense of the impact of multi-level structure-phase state on the mechanical properties of the surface layer of the material is in the redistribution of elastic energy as due to the interaction of the elastic fields of structural elements of different scale levels, and by reducing the scale level of plastic strain localization.

**Keywords:** structure-phase states, fatigue, resource, electron-beam treatment, steel, silumin, scanning and transmission electron microscopy.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-346-351

### REFERENCES

1. Belov A.B., Bytsenko O.A., Krainikov A.V. etc. *Sil'notochnyye impul'snyye elektronnyye puchki dlya aviatsionnogo dvigatelestroeniya* [High-current pulse electron beams for aviation engine-building]. Novikov A.S., Shulov V.A., Engel'ko V.I. eds. Moscow: Dipak, 2012. 292 p. (In Russ.).
2. Surzhikov A.P., Frangul'yan T.S., Gyngazov S.A., Mel'nikov A.G., Koval' N.N., Devyatkov V.N. Property modification of a zirconium ceramics with high-current beam of low-energy electrons. *Perspektivnyye materialy*. 2006, no. 4, pp. 58–64. (In Russ.).
3. Kurzina I.A., Kozlov E.V., Popova N.A., Kalashnikov M.P., Nikonenko E.L., Savkin K.P., Oks E.M., Sharkeev Yu.P. Modifying the structural phase state of fine-grained titanium under conditions of ion irradiation. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2012, Vol. 76, no. 11, pp. 1238–1245.
4. Peretyat'ko V.N., Temlyantsev M.V., Filippova M.V. *Razvitie teorii i praktiki metallurgicheskikh tekhnologii. T. 2. Plastichnost' i razrushenie stali v protsessakh nagreva i obrabotki davleniem* [The development of the theory and practice of metallurgical technologies. Vol. 2. Plasticity and fracture of steel in the processes of heating and forming]. Moscow: Teplotekhnika, 2010. 352 p. (In Russ.).
5. Chernov I.P., Berezneeva E.V., Beloglazova P.A., Ivanova S.V., Kireeva I.V., Lider A.M., Remnev G.E., Pushilina N.S., Cherdantsev Yu.P. Physicomechanical properties of the surface of a zirconium alloy modified by a pulsed ion beam. *Technical Physics*. 2014, Vol. 59, no. 4, pp. 535–539.
6. Marushchak P.O., Hlad'o V.B., Bishchak R.T., Pylypenko A.P. *Materials Science*. 2010, Vol. 46, Issue 1, pp. 102–107.
7. Shulepov M.A., Akhmadeev Yu.Kh., Tarasenko V.F., Kolubaeva Yu.A., Krysina O.V., Kostyrya I.D. Modification of copper surface layers at volume discharge impact, initiated electron beam of avalanches in nitrogen and CO<sub>2</sub> of atmospheric pressure. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2010, Vol. 53, no. 12, pp. 63–66. (In Russ.).
8. Belyi A.V., Kukareko V.A., Taran I.I., Shikh S.K., Sandomirskii S.G. Formation and properties of nanostructured surface layers in austenitic steels, subjected to ion-beam nitriding. *Poverkhnost'*

- Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya*. 2006, no. 7, pp. 100–106. (In Russ.).
9. Struts V.K., Remnev G.E. Impact research of powerful pulse ion beams on P6M5 tool steel. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2010, no. 10/2, pp. 125–128. (In Russ.).
  10. Panova T.V., Kovivchak V.S., Blinov V.I. X-ray diffraction analysis of double-layer systems irradiated by a high-power ion beam. *Journal of Surface Investigation*. 2008, Vol. 2, issue 24, no. 8, pp. 652–656.
  11. Devyatkov V.N., Koval N.N., Schanin P.M., Grigoryev V.P., Koval T.B. *Laser and Particle Beams*. 2003, Vol. 21, pp. 243–248.
  12. Utevskaia L.M. *Difraktsionnaya elektronnaya mikroskopiya v metall-ovedenii* [Diffraction electron microscopy in physical metallurgy]. Moscow: Metallurgiya, 1973. 584 p. (In Russ.).
  13. Tomas Gareth, Goringe Michael J. Transmission electron microscopy of materials. New York-Chichester-Brisbane-Toronto, John Wiley Sons, 1979, 320 p. (Russ.ed.: Tomas G., Goringe M. *Prosvetchivayushchaya elektronnaya mikroskopiya materialov*. Moscow: Nauka, 1983. 320 p.).
  14. Engel L., Klingele G. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen von Metallschaden. München/Wien: 1982. (Russ.ed.: Engel L., Klingele G. *Rastrovaya elektronnaya mikroskopiya. Razrushenie*. Moscow: Metallurgiya, 1986. 232 p.).
  15. Ivanov Yu.F., Koval' N.N., Gorbunov S.V., Vorob'ev S.V., Kononov S.V., Gromov V.E. Multicyclic fatigue of stainless steel treated by a high-intensity electron beam: Surface layer structure. *Russian Physics Journal*. 2011, Vol. 54, no. 5, pp. 575–583.
  16. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Sizov V.V., Vorob'ev S.V., Kononov S.V. Increase in the fatigue durability of stainless steel by electron-beam surface treatment. *Journal of Surface Investigation*. 2013, no. 1, pp. 94–98.
  17. Grishunin V.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Teresov A.D., Kononov S.V. Evolution of the phase composition and defect substructure of rail steel subjected to high-intensity electron-beam treatment. *Journal of Surface Investigation*. 2013, Vol. 7, Issue 5, pp. 990–995.
  18. Ivanov Yu.F., Bessonov D.A., Vorob'ev S.V., Gromov V.E., Kolubaeva Yu.A., Tsellermaer V.Ya. On the fatigue strength of grade 20Cr13 hardened steel modified by an electron beam. *Journal of Surface Investigation*. 2013, Vol. 7, no. 1, pp. 90–93.
  19. Ivanov Yu.F., Alsaraeva K.V., Gromov V.E., Petrikova E.A., Teresov A.D., Tkachenko A.V. Increase of silumin fatigue resource at the treatment with high-intensive pulse electron beam. *Fundamental'nye problemy sovremenogo materialovedeniya*. 2014, Vol. 11, no. 3, pp. 281–285. (In Russ.).
  20. Panin V.E., Grinyaev Yu.V., Psakh'e S.G. Physical Mesomechanics: achievements over two decades of development, problems and prospects. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2004, Vol. 7, Spec. Issue, Part. 1, pp. 25–40. (In Russ.).
- Acknowledgements.** The work was financially supported by the Grant of President of Russian Federation for state support of young Russian scientists-candidates of science MK-4166.2015.2 and doctors of sciences MD-2920.2015.8, RFBR within the framework of scientific projects no. 13-02-12009 ofi\_m, 15-08-03411, 14-08-a, state task of the Ministry of Education no. 2708 and 3.1496.2014/K on the performance of research work.

Received November 12, 2014

УДК 669.184

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ АГРЕГАТЫ – ЭФФЕКТИВНЫЕ УТИЛИЗАТОРЫ ОПАСНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

*Кузнецов С.Н., магистрант кафедры металлургии черных металлов*

*Волынкина Е.П., д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики*

*и экологии (ekaterina.volynkina@gmail.com)*

*Протопопов Е.В., д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов, ректор*

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

**Аннотация.** Органические отходы составляют основную долю всех опасных отходов. Особую опасность для окружающей среды представляют органические отходы, содержащие хлор. В мире основным методом уничтожения опасных органических отходов является высокотемпературное сжигание в специальных инсинераторах и во вращающихся цементных печах. Однако при сжигании существует опасность вторичного образования таких супертоксикантов, как диоксины и фураны. Выполненный сравнительный анализ условий образования диоксинов при сжигании отходов в инсинераторах, цементных печах и высокотемпературных металлургических агрегатах (кислородный конвертер) показал преимущества последних благодаря высоким температурам, интенсивному тепло- и массообмену, активной окислительной атмосфере, наличию высокоактивного основного шлака, быстрому охлаждению и дожиганию отходящих газов. Проведенные исследования содержания 17 изомеров диоксинов и фуранов в пыли отходящих конвертерных газов на сравнительных и опытных плавках с использованием отходов бумаги и пластмасс в условиях ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» показали, что их суммарная концентрация значительно ниже европейских стандартов для отходящих газов стационарных источников. При этом не установлено существенных различий в концентрациях и в изомерном профиле диоксинов и фуранов на сравнительной и опытной плавках.

**Ключевые слова:** опасные органические отходы, диоксины, сжигание, инсинератор, цементная печь, кислородный конвертер.

**DOI:** 10.15825/0368-0797-2015-5-352-358

Органические отходы составляют основную долю всех опасных отходов в мире. К опасным органическим отходам относятся: нефтесодержащие отходы (отработанные масла, нефтешламы и нефтезагрязненные грунты, отходы от зачистки нефтепромыслового и нефтеперерабатывающего оборудования, отработанные автомобильные фильтры), отходы химического и коксохимического производств, биологические и медицинские отходы, отработанные угольные и тканевые фильтры газоочистных установок и пр.

Особую опасность для окружающей среды представляют органические отходы, содержащие хлор. К хлорорганическим отходам относят широкую гамму веществ:

- хлорорганические полимеры (ПВХ, хлоропреновый каучук, хлорированные полиэфиры, полистиролы, полиамиды) отслуживших свой срок изделий;
- отработанные хлорорганические растворители;
- диэлектрики;
- пришедшие в негодность хлорорганические пестициды;
- не утилизируемые легкие фракции, кубовые остатки и смолы предприятий хлорорганического синтеза;
- сточные воды, образующиеся при производстве и применении хлорорганических продуктов.

Двенадцать особо опасных для человека хлорорганических веществ, являющихся стойкими органическими загрязнителями (СОЗ), запрещены к производству и использованию Стокгольмской конвенцией «О стойких органических загрязнителях». Это так называемая «грязная дюжина»: полихлорированные бифенилы (ПХБ), полихлорированные дибензо-п-диоксины (ПХДД), полихлорированные дибензофураны (ПХДФ), алдрин, диэлдрин, дихлор-дифенил-трихлорэтан (ДДТ), эндрин, хлордан, гексахлорбензол (ГХБ), мирекс, токсафен и гептахлор [1]. Хлорорганические соединения входят в состав твердых бытовых отходов (ТБО), например, в состав некоторых видов пластмасс и отходов лечебно-профилактических учреждений, подвергающихся дезинфекции хлорсодержащими дезинфицирующими растворами. Стойкие органические загрязнители являются высокотоксичными веществами для всех живых организмов, они аккумулируются в жировых тканях, являются канцерогенами, мутагенами, эмбрио-, нейро-, иммунотоксинами, негативно влияют на гормональную и репродуктивную системы, вызывают анемию, болезни печени и почек. Эти загрязнители не подвергаются биодegradации в окружающей среде, поэтому согласно Стокгольмской конвенции, ратифицированной Россией в 2011 г. [2], их захоронение на полигонах

запрещено. Отходы СОЗ подлежат сбору с целью последующей утилизации.

Основным методом уничтожения СОЗ в мире является высокотемпературное сжигание [3–6]. Как отмечается в работе [3], сжигание применимо для органических отходов практически всех видов, так как позволяет перевести основные элементы большинства органических соединений углерода, водорода, кислорода в безопасные для окружающей среды соединения  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , а при наличии хлора – в хлористый водород, утилизируемый в системе мокрой газоочистки. Однако для обеспечения полного разложения опасных органических соединений необходимо соблюдение целого ряда условий:

- температура сжигания не менее 1200 °С;
- время пребывания продуктов сгорания в камере не менее 2 с (правило двух секунд);
- избыток кислорода в зоне горения;
- быстрое охлаждение отходящих газов до температуры ниже 200 °С, при которой невозможно вторичное образование диоксинов.

Несоблюдение этих условий может привести к образованию в процессе сжигания полициклических ароматических углеводородов, многие из которых являются канцерогенами (например, бензапирен) и высокотоксичных полихлорированных дибензодиоксинов и дибензофуранов.

За последние десятилетия технология сжигания отходов в мире проделала большой путь от открытого сжигания и простых мусоросжигателей, сильно загрязнявших окружающую среду, до современных, эффективных инсинераторов, оборудованных сложной системой очистки отходящих газов и обеспечивающих минимальные выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду.

В России в настоящее время производится несколько типов инсинераторов, которые предлагаются для сжигания различных видов твердых и жидких органических отходов, включая химические, медицинские, биологические отходы, нефтешламы, а также хлорорганические отходы, входящие в список СОЗ (например, ПХБ-масла, пестициды, гербициды). Инсинератор представляет собой камеру, футерованную кирпичом, снабженную горелкой, работающей на дизельном топливе или природном газе. В инсинераторах, как правило, используется двухступенчатая технология уничтожения отходов путем их сжигания при температуре 850 – 900 °С и дожигания образующихся газов при температуре 1100 – 1200 °С с последующей их механической и химической очисткой.

За рубежом для утилизации опасных органических отходов широко используют вращающиеся цементные печи. В 2003 г. в «Докладе первой сессии группы экспертов по наилучшим имеющимся методам и наилучшим видам природоохранной деятельности» ЮНЕП ООН [7] цементные печи рекомендованы для

разложения ПХДД и ПХДФ. В цементных печах технологически возможно обеспечение указанных выше условий, обеспечивающих полное разложение органических соединений отходов, включая хлорорганические.

Известным международным документом, содержащим реестр данных о выбросах ПХДД и ПХДФ в различных технологических процессах, является «Методическое руководство по выявлению и оценке выбросов диоксинов и фуранов», разработанное ЮНЕП в рамках программы ООН по окружающей среде [8]. В этом руководстве указывается, что «ПХДД и ПХДФ могут поступать на сжигание с перерабатываемыми отходами, образоваться в процессе горения или по завершению процесса горения при охлаждении дымовых газов». В связи с этим, в работе [7] указывается на следующие первичные способы и меры оптимизации производственного процесса с целью сокращения образования ПХДД и ПХДФ:

- непрерывная подача топлива и отходов с регистрацией и учетом содержания тяжелых металлов, хлора, серы;
- обеспечение контроля материалов, загружаемых в печь;
- предварительная обработка отходов с целью обеспечения более однородной загрузки, что способствует эффективному сгоранию при более стабильных условиях (сушка, измельчение, перемешивание, размалывание);
- загрузка отходов в основную или во вторичную камеру в печах с предварительным прокаливанием или нагреванием (температура более 900 °С);
- отходы не подлежат загрузке вместе с сырьевой смесью, если они содержат органические вещества;
- стабилизация технологических параметров (постоянство свойств топлива, постоянная дозировка, избыток кислорода, контроль содержания оксида углерода (угарного газа));
- не допускается загрузка отходов на этапах пуска и остановки печи;
- быстрое охлаждение отходящих газов до температур ниже 200 °С.

Доказана возможность достижения за счет первичных мер на существующих установках содержания ПХДД в отходящих газах на уровне менее 0,1 нг/м<sup>3</sup>, допускаемом европейскими нормами. Если все указанные способы не приводят к снижению показателя до уровня менее 0,1 нг/м<sup>3</sup>, в работе [7] рекомендовано использовать в качестве вторичных мер совершенствование методов очистки отходящих газов от пыли, например, использование фильтров из активированного угля или избирательное каталитическое восстановление.

Однако технология производства цемента во вращающихся печах не может гарантировать полного разложения органических отходов. В цементных печах существует несколько температурных зон, непрерывно

переходящих друг в друга: зона подогрева (500 – 600 °С); зона кальцинирования (900 – 1200 °С); зона спекания (1450 °С); зона охлаждения (1000 – 1200 °С). Лишь одна из этих зон обеспечивает предотвращение образования ПХДД и ПХДФ, но при выдерживании временных условий. Однако именно это гарантировано быть не может, поскольку топочные газы последовательно проходят через все температурные зоны, причем время пребывания в каждой из зон вряд ли может быть точно выдержано из-за их непрерывности. Согласно нормативам Европейского Союза (НЕС) геометрия горячей зоны печи должна обеспечивать пребывание газов в зоне с температурой не ниже 850 °С в течение не менее 2 с (правило двух секунд) при концентрации кислорода не менее 6 %. Это очень жесткое требование выдержать непросто. Повышение выбросов наблюдается в начале работы печи, поэтому НЕС предусматривают начало пиролиза или сжигания мусора только после разогрева печи до 850 °С [7].

Высокотемпературные металлургические агрегаты (такие, как доменная печь или кислородный конвертер) обеспечивают более безопасное сжигание горючих компонентов отходов, чем инсинераторы или цементные печи. Инсинераторы и цементные печи не могут конкурировать с металлургическими агрегатами по условиям обезвреживания токсичных отходов: температуре свыше 2000 °С, активной окислительной или восстановительной атмосфере, интенсивному тепло- и массообмену, наличию высокоактивных основных шлаков, обеспечивающих связывание негорючего остатка от сжигания отходов и его остеклование. В таких условиях практически невозможно образование диоксинов. Кроме этого мощные металлургические агрегаты оснащены полным набором оборудования для улавливания и очистки выделяющихся газов (включая мокрую ступень газоочистки), а также имеют замкнутую систему водоснабжения.

В руководстве ЮНЕП по выявлению и количественной оценке выбросов диоксинов и фуранов [5] приведены значения эмиссии ПХДД и ПХДФ в различных технологических процессах (табл. 1).

Высокотемпературные металлургические агрегаты обеспечивают минимальные выбросы в атмосферу диоксинов и фуранов: на один-два порядка ниже, чем все известные наиболее современные агрегаты, используемые в настоящее время в мире для сжигания опасных органических отходов. При этом сжигание органических отходов в металлургических агрегатах обеспечивает дополнительный приход тепла и экономии традиционно используемых энергоносителей (кокса, угля, мазута, природного газа и пр.). Технологически в доменной печи возможно обезвреживание жидких и твердых органических отходов крупностью менее 100 мм, а в кислородном конвертере – твердых органических отходов крупностью 5 – 10 мм.

Рассмотрим технологическую возможность обезвреживания опасных органических отходов в кислородных конвертерах ОАО «ЕВРАЗ объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» («ЕВРАЗ ЗСМК»). Горение отходов протекает при следующих температурах:

- период нагрева лома – свыше 1000 °С;
- период заливки жидкого чугуна – свыше 1380 °С;
- период продувки – от 1440 – до свыше 2000 °С.

Сжигание отходов в конвертере происходит в атмосфере технически чистого (не ниже 99,5 %) кислорода, обеспечивающей высокую интенсивность процессов тепло- и массообмена, при которой происходят эффективное полное сгорание всех органических компонентов топлива и сырья и разрушение структурной решетки сложных органических соединений, в том числе и диоксинов.

Отходы находятся в конвертере в течение всего периода плавки, полное сгорание происходит при про-

Т а б л и ц а 1

**Эмиссия ПХДД и ПХДФ из различных источников**

*Table 1. Emissions of PCDD and PCDF from various sources*

Источник	Эмиссия, мкг ТЭ/т продукта			
	в воздух	в продукт	в отходы	
			золу	шлак
Сжигание ТБО на мусоросжигательном заводе со сложной системой газоочистки	0,50	н.п.	15	1,5
Сжигание медицинских отходов в инсинераторах со сложной системой газоочистки	1,00	н.п.	150	–
Цементная печь	0,15 – 5,00	н.д.	0,003 – 1,0	–
Доменная печь	0,01	н.п.	–	н.п.
Кислородный конвертер	0,06	н.п.	–	1,5

П р и м е ч а н и е: ТЭ – международный токсический эквивалент; н.п. – не переходит; н.д. – нет данных.

греве лома и последующей продувке. С самого первого момента поступления отходов в конвертер они находятся в тесном контакте с флюсами, основным из которых является известь. При продувке известь обеспечивает формирование основного кальцийсодержащего шлака. Наличие значительных количеств извести в конвертере способствует ускорению реакций разложения и окисления сложных органических веществ и разрушению диоксинов. Остатки от горения отходов переходят в расплавленный шлак, который поглощает все продукты горения, при последующем охлаждении остекловывается и не представляет опасности для окружающей среды.

Конвертеры оборудованы газоотводящими трактами, служащими для отвода, охлаждения, очистки и дожигания конвертерных газов. Отходящие из конвертера газы проходят котел-охладитель, где температура снижается до 850 °С, а затем направляются в первую ступень очистки – орошаемый газоход, где происходит дальнейшее охлаждение газов до 250 – 300 °С, грубая очистка и увлажнение их до полного насыщения. Насыщенные газы затем проходят I и II ступени прямоугольных труб Вентури, в которых происходит их основная очистка, и после каплеуловителя осушенные газы поступают в дожигающее устройство. Мокрая очистка отходящих газов обеспечивает высокую степень улавливания пыли – до 99,5 %. Обратная вода мокрой системы газоочистки характеризуется значением рН на уровне 11 – 12 ед., что свидетельствует о высоком содержании в ней извести. Высокая щелочность оборотной воды способствует высокой эффективности улавливания хлорсодержащих газов (хлористого водорода, газообразного хлора) из отходящих конвертерных газов. Таким образом, в существующей системе газоочистки конвертеров имеются благоприятные условия для улавливания хлорсодержащих примесей из отходящих газов в тех случаях, когда они образуются, например, при попадании в отходы изделий из ПВХ или дезинфекции отходов хлорсодержащими дезинфицирующими препаратами.

В табл. 2 приведена сравнительная характеристика условий образования диоксинов в различных технологических процессах, используемых для сжигания опасных органических отходов: в инсинераторе, во вращающейся цементной печи, в высокотемпературном металлургическом агрегате.

При выплавке стали в конвертерном процессе обеспечиваются условия бездиоксиновой переработки отходов:

- высокотемпературный режим сжигания при температурах выше 1250 °С;
- интенсивный тепло- и массообмен;
- активная окислительная атмосфера с избытком технически чистого кислорода;
- высокоактивный жидкий шлак, поглощающий серо- и галогенсодержащие соединения, при затвердевании – остеклованный шлак;

- быстрое охлаждение дымовых газов в мокрой системе газоочистки до 40 – 60 °С;
- дожигание газов на факеле горелки с температурой 1500 °С.

Мокрая трехступенчатая очистка отходящих газов, обеспечивающая высокую (99,5 %) степень улавливания пыли и быстрое охлаждение газов до 40 – 60 °С, а также дожиг отходящих газов исключают возможность повторного синтеза диоксинов.

Таким образом, высокотемпературные металлургические агрегаты (в частности, кислородные конвертеры) являются наиболее безопасными из известных в настоящее время агрегатов для сжигания опасных органических отходов, в том числе хлорсодержащих.

В условиях ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» были проведены опытно-промышленные плавки с использованием специально подготовленных опытных партий твердых бытовых отходов: прессованных отходов бумаги, картона и полиэтилена; дробленых до крупности менее 20 мм корпусов электронной техники, состоящих из полистирола.

Опытные плавки проведены в ККЦ-2 на конвертере № 4 емкостью 350 т. Продувку опытных и сравнительных плавков проводили по действующей технологической инструкции. Расход ТБО составлял 1,0 – 8,8 кг/т стали. Установлено, что основные технологические параметры опытных и сравнительных плавков различались незначительно. Плавки с ТБО проведены практически без использования углеродсодержащих теплоносителей, при этом температура стали на повалке превышала температуру стали на сравнительных плавках. В результате выполненных расчетов материального и теплового балансов конвертерной плавки установлено, что при вводе в конвертер горючих компонентов ТБО с расходом 7,2 кг/т стали в конвертер дополнительно вносится 8338,1 кДж тепловой энергии, что составляет 4,21 % от общего прихода тепла.

Технология опытных плавков заключалась в подаче тюков прессованной бумаги и полиэтилена и мешков с дробленным полистиролом в конвертер в завалку совместно с ломом и флюсами (известь). После завалки проводили прогрев шихты путем сжигания отходов в струе технически чистого кислорода в течение 5 – 6 мин. Затем в конвертер заливали жидкий чугун и далее вели плавку обычным способом с продувкой расплава кислородом в течение 17 – 18 мин. и добавкой по ходу плавки флюсов.

Результаты промышленных испытаний подробно описаны в работе [9]. Основные технологические параметры опытных и сравнительных плавков различались очень незначительно. Отмечена более высокая температура стали на повалке на опытных плавках – 1706 и 1655 °С, на сравнительных плавках она составила 1619 – 1661 и 1629 °С соответственно, что свидетельствует о более высоких температурах в ванне в период плавки вследствие высокой теплоты сгорания отходов.

**Сравнительная характеристика условий образования диоксинов и технологических параметров агрегатов, используемых для сжигания опасных органических отходов**

*Table 2. Comparative characteristics of the conditions for the formation of dioxins and technological parameters of units used for the incineration of hazardous organic wastes*

Технологический параметр	Условия образования диоксинов	Технологические агрегаты		
		инсинератор	цементная вращающаяся печь	кислородный конвертер
Способ загрузки отходов	Загрузка большими партиями	Загрузка большими партиями	Предварительная обработка отходов, обеспечивающая равномерную загрузку небольшими партиями	Загрузка отходов небольшими партиями с расходом 0,1 – 2,0 кг/т стали, что наряду с высокоинтенсивной кислородной продувкой обеспечивает хорошие условия тепло- и массообмена при их сжигании
Температура горения, °С	< 900	850 – 900	От 500 до 1450 (температурные зоны)	От 1440 до свыше 2000 (высокотемпературный режим сжигания)
Содержание O <sub>2</sub> , %	Недостаток окислителя	21	21	99,5 (избыток кислорода, кислородное дутье)
Очистка отходящих газов	Пылеуловители, функционирующие при повышенных температурах (более 200 °С)	Сухая очистка, в отдельных случаях мокрая в скруббере с эффективностью очистки от пыли 93 %	Очистка в электрофильтрах	Мокрая трехступенчатая очистка, обеспечивающая высокую (99,5 %) степень улавливания пыли и быстрое охлаждение газов до 40 – 60 °С
Дожигание отходящих газов	Отсутствие	Дожигание на факеле горелки с температурой 1500 °С	Отсутствие	Дожигание на факеле горелки (свеча) с температурой 1500 °С
Образование золы/шлака		Зола	Зола	Высокоактивный жидкий шлак, содержащий более 50 % СаО, что создает хорошие условия для поглощения серы и галогенов. При затвердевании – остеклованный шлак.

Средняя запыленность отходящих газов после очистки составила 117 мг/м<sup>3</sup>.

Аккредитованной лабораторией Башкирского регионального экологического центра (г. Уфа) по методике US EPA-1613, адаптированной к условиям РФ, выполнен анализ пыли на выходе потока газовых выбросов в опытных и сравнительных плавках на содержание диоксинов. Методика заключалась в экстрагировании диоксинов растворителями из объекта окружающей среды, выделении диоксинов из матрицы, очистки их от присутствующих примесей на сорбентах. Количественный анализ осуществляли методом изотопного разбавления с помощью хромато-масспектрометра высокого разрешения. В качестве внутренних стандартов использовали все 17 изомеров диоксинов и фуранов, меченных изотопом углерода C<sup>13</sup>. Исследовали пять изомеров тетрахлордиоксинов – 1,3,6,8 – ТХДД, 1,2,3,4 – ТХДД, 1,2,3,7 – ТХДД,

2,3,7,8 – ТХДД, 1,2,3,9 – ТХДД. Результаты количественного изомерспецифического анализа полихлорированных дибензо-пара-диоксинов и дибензофуранов приведены в табл. 3.

По результатам исследований не установлено существенных различий ни в концентрациях, ни в изомерном профиле обеих проб. Суммарный коэффициент токсичности пробы ТЕQ (сумма приведенной токсичности всех изомеров) также различается незначительно.

Полученные экспериментальные данные по содержанию ПХДД и ПХДФ в пробах золы можно использовать для оценки загрязнения выбросов отходящих газов. Если принять, что проанализированные образцы являются осевшей пылью, выбрасываемой из трубы с топочными газами в атмосферу, то количество выбрасываемых диоксинов, связанных с частицами пыли, будет зависеть от концентрации взвешенных частиц в отходящих газах. Так, если концентрация взвешенных

**Концентрации изомеров и коэффициенты токсичности (TEQ-WHO) изомеров в пересчете на токсичность 2,3,7,8-ТХДД в соответствии с факторами эквивалентной токсичности (TEF) в уловленной пыли на опытной и сравнительной плавках**

*Table 3. The concentrations and ratios of isomers toxicity (TEQ-WHO) based on the toxicity of 2,3,7,8-TCDD in accordance with toxicity equivalent factors (TEF) in the caught dust at the experimental and comparative heats*

Изомеры	Опытная плавка		Сравнительная плавка	
	Концентрация, пг/г пыли	TEQ-WHO, пг/г пыли	Концентрация, пг/г пыли	TEQ-WHO, пг/г пыли
2,3,7,8 – ТХДД	5,36	5,36	5,78	5,78
1,2,3,7,8 – ПнХДД	4,90	4,90	6,99	6,99
1,2,3,4,7,8 – ГкХДД	2,89	0,29	1,78	0,18
1,2,3,6,7,8 – ГкХДД	4,49	0,45	3,54	0,35
1,2,3,7,8,9 – ГкХДД	0,86	0,09	0,06	0,01
1,2,3,6,7,8 – ГпХДД	8,95	0,09	11,18	0,11
ОХДД	18,71	0,00	18,47	0,00
2,3,7,8 – ТХДФ	898,51	89,85	651,86	65,19
1,2,3,7,8 – ПнХДФ	262,34	13,12	247,41	12,37
2,3,4,7,8 – ПнХДФ	269,53	134,77	342,77	171,39
1,2,3,4,7,8 – ГкХДФ	86,53	8,65	96,35	9,64
1,2,3,6,7,8 – ГкХДФ	99,76	9,98	123,17	12,32
1,2,3,7,8,9 – ГкХДФ	6,61	0,66	8,46	0,85
2,3,4,6,7,8 – ГкХДФ	43,69	4,37	64,36	6,44
1,2,3,4,6,7,8 – ГпХДФ	54,50	0,55	50,58	0,51
1,2,3,4,7,8,9 – ГпХДФ	15,44	0,15	13,71	0,14
ОХДФ	18,80	0,00	16,35	0,00
Сумма ПХДД, пг/г пыли	<b>46,16</b>	<b>11,18</b>	<b>47,8</b>	<b>13,42</b>
Сумма ПХДФ, пг/г пыли	<b>1755,71</b>	<b>262,09</b>	<b>1615,02</b>	<b>278,82</b>
Сумма ПХДД и ПХДФ, пг/г пыли	<b>1801,87</b>	<b>273,27</b>	<b>1662,82</b>	<b>292,24</b>

частиц в отходящих газах составляет 117 мг/м<sup>3</sup>, то суммарное содержание диоксинов и фуранов в отходящих газах опытной плавки составило 31,94 пг/м<sup>3</sup>, сравнительной плавки – 34,40 пг/м<sup>3</sup>. Следует отметить, что европейский стандарт для отходящих газов стационарных источников составляет 0,1 нг/м<sup>3</sup>.

**Выводы.** Анализ условий протекания высокотемпературных технологических процессов в металлургических агрегатах и результаты проведенных исследований показывают, что высокотемпературные металлургические агрегаты являются на сегодняшний день наиболее безопасными для переработки опасных органических отходов, в том числе содержащих такие опасные для человека супертоксиканты, как диоксины или фураны, а также канцерогенные углеводороды, которые в значительных количествах образуются в процессе сжигания некоторых видов отходов даже на мусоросжигательных заводах и тем более при неорганизованном горении на свалках. Использование для переработки ТБО плавильных агрегатов черной металлургии может в значитель-

ной степени решить проблему утилизации опасных органических отходов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Текст Стокгольмской конвенции о стойких органических загрязнителях // UNEP/POPS/CONF. 2001. № 2. – 43 с.
2. О ратификации Стокгольмской конвенции о стойких органических загрязнителях. Федеральный закон № 164-ФЗ: принят Гос. Думой 27 июня 2011 г. Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://www.rg.ru/2011/06/29/konvenciya-dok.html>. (Дата обращения 14.01.2015).
3. Доусон Г., Мерсер Б. Обезвреживание токсичных отходов / Сокр. пер. с англ. В.А. Овчаренко. – М.: Стройиздат, 1996. – 288 с.
4. Крайнов И.П., Скоробогатов В.М. Технологии уничтожения стойких органических загрязнителей // Экотехнологии и ресурсосбережение. 2002. № 4. С. 45 – 57.
5. Orris P., Chary L.K., Perry K., Astury J. Persistent organic pollutants (POPs) and human health. – Washington: WERNA, 2000. – 38 p.
6. Инженерная защита окружающей среды. Очистка вод. Утилизация отходов / Под ред. Ю.А. Бирмана, Н.Г. Вурдовой. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2002. – 296 с.

7. Доклад сопредседателей Группы экспертов по наилучшим имеющимся методам и наилучшим видам природоохранной практики. Программа ООН по окружающей среде. 5 января 2005 г. Электронный ресурс. – Режим доступа: <http://mognovse.ru/loo-organizaciya-obedinennih-nacij-ep-unerpopsegb-33.html> (Дата обращения 14.01.2015).
8. Методическое руководство по выявлению и оценке выбросов диоксинов и фуранов. Программа ООН по окружающей среде. Январь 2001 г., Женева. Электронный ресурс. – Режим доступа: [www.chem.unep.ch/pops/pdf/toolkit/toolkitru.pdf](http://www.chem.unep.ch/pops/pdf/toolkit/toolkitru.pdf) (Дата обращения 14.01.2015).
9. Волынкина Е.П., Климовская И.А., Протопопов Е.В. и др. Переработка горючих компонентов твердых бытовых отходов в металлургии. – В кн.: Управление отходами – основа восстановления экологического равновесия в Кузбассе. Сб. докладов второй междунар. науч.-практ. конф., (8-10 окт., 2008 г.) / Под ред. Е.П. Волынкиной. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2008. С. 241 – 251.

Поступила 15 января 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 5, pp. 352–358.

## HIGH-TEMPERATURE METALLURGICAL AGGREGATES – EFFECTIVE UTILIZERS OF HAZARDOUS ORGANIC WASTES

**Kuznetsov S.N.**, MA student of the Chair of ferrous metallurgy

**Volynkina E.P.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal power and Ecology”

(ekaterina.volynkina@gmail.com)

**Protopopov E.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of ferrous metallurgy, Rector

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

**Abstract.** Organic waste makes up the bulk of all hazardous waste. Organic waste containing chlorine has a particular danger to the environment. The main method of reduction of hazardous organic waste in the world is high-temperature incineration in special incinerators, as well as in rotary cement kilns. However, there is a danger of secondary generation of supertoxicants as dioxins and furans. The performed comparative analysis of the conditions of generation of dioxins in incinerators, cement kilns and high-temperature metallurgical aggregates (an oxygen steel-making converter) has shown the benefits of the last due to the high temperature, the intensity of heat and mass transfer, the active oxidizing atmosphere, the highly basic slag, rapid cooling and afterburning off-gas. The conducted studies of the content of 17 isomers of dioxins and furans in the dust in converter gas on comparative and experimental melts using paper and plastic waste in conditions of OJSC “EVRAZ ZSMK” have shown that their total concentration is significantly lower than the European standards for off-gases from stationary sources. Significant differences in the concentrations and in the isomeric profile of dioxins and furans on the comparative experimental melts have not been found.

**Keywords:** hazardous organic wastes, dioxine, combustion, incinerator, cement kiln, oxygen steel-making converter.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-352-358

### REFERENCES

1. *Tekst Stokgol'mskoi konventsii o stoikikh organicheskikh zagryaznitelyakh* [Text of Stockholm convention of persistent organic pollutants]. UNEP/POPS/CONF. 2001, no. 2, 43 p. (In Russ.).
2. *O ratifikatsii Stokgol'mskoi konventsii o stoikikh organicheskikh zagryaznitelyakh. Federal'nyi zakon № 164-FZ: prinyat Gos. Dumoi 27 iyunya 2011 g.* [On ratification of Stockholm convention of persistent organic pollutants. Federal law no. 164-FZ: enacted by State Duma June, 27 2011]. Available at: <http://www.rg.ru/2011/06/29/konvenciya-dok.html>. (Accessed: 14.01.2014). (In Russ.).
3. Dawson Gaynor W., Mercer Basil W. Hazardous Waste Management. New York, Wiley. 1986. 532 p. (Russ.ed.: Dawson G., Mercer B. *Obezvrezhivanie toksichnykh otkhodov*. Ovcharenko V.A. ed. Moscow: Stroizdat, 1996. 288 p.).
4. Krainov I.P., Skorobogatov V.M. Reduction technology of persistent organic pollutants. *Ekotekhnologii i resursosberezhenie*. 2002, no. 4, pp. 45–57. (In Russ.).
5. Orris P., Chary L.K., Perry K., Astury J. *Persistent organic pollutants (POPs) and human health*. Washington: WEPHA, 2000. 38 p.
6. *Inzhenernaya zashchita okruzhayushchei sredy. Ochistka vod. Utilizatsiya otkhodov* [Engineering environmental protection. Water purification. Waste disposal]. Birman Yu.A., Vurdova N.G. eds. Moscow: Izd-vo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2002. 296 p. (In Russ.).
7. *Doklad sopredsedatelei Gruppy ekspertov po nailuchshim imeyushchimsya metodam i nailuchshim vidam prirodookhrannoi praktiki. Programma OON po okruzhayushchei srede. 5 yanvarya 2005 g.* [Co-chairmen report of expert group on the optimal available methods and optimal kinds of nature conservation practice. UN Environment Program. January, 5 2005]. Available at: <http://mognovse.ru/loo-organizaciya-obedinennih-nacij-ep-unerpopsegb-33.html>. (Accessed: 14.01.2014). (In Russ.).
8. *Metodicheskoe rukovodstvo po vyyavleniyu i otsenke vybrosov dioksinov i furanov. Programma OON po okruzhayushchei srede. Yanvar' 2001 g., Zheneva* [Study guide on the identification and estimation of dioxin and furan emission. UN Environment Program. January, 2001, Geneva]. Available at: [www.chem.unep.ch/pops/pdf/toolkit/toolkitru.pdf](http://www.chem.unep.ch/pops/pdf/toolkit/toolkitru.pdf). (Accessed: 14.01.2014). (In Russ.).
9. Volynkina E.P., Klimovskaya I.A., Protopopov E.V. etc. *Pererabotka goryuchikh komponentov tverdykh bytovykh otkhodov v metallurgii* [Processing of combustible components of solid domestic waste in metallurgy]. In.: *Upravlenie otkhodami – osnova vostanovleniya ekologicheskogo ravnovesiya v Kuzbasse. Sb. Dokladov vtoroi mezhduunar. nauch.-prakt. konf., (8–10 okt., 2008 g.)* [Waste management – basis of recovery of the ecological balance in Kuzbass. Reports collection of the II International theoretical and practical conference (October, 8 – 10, 2008)]. Volynkina E.P. ed. Novokuznetsk: izd. SibGIU, 2008, pp. 241–251. (In Russ.).

Received January 15, 2015

УДК 628.474.76

## ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА И КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ КОМПОНЕНТОВ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

**Зоря В.Н.**<sup>1,2</sup>, исполнительный директор, соискатель кафедры теплоэнергетики и экологии

**Коровушкин В.В.**<sup>3</sup>, д. геол.-мин. н., ведущий эксперт кафедры «Экстракция и рециклинг черных металлов», профессор

**Пермяков А.А.**<sup>2</sup>, к. геол.-мин. н., профессор-консультант лаборатории экологии и комплексного использования минеральных отходов

**Волюнкина Е.П.**<sup>2</sup>, д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики и экологии (ekaterina.volynkina@gmail.com)

<sup>1</sup> ООО «ТехРесурс»

(654000, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Орджоникидзе, 13, оф. 261)

<sup>2</sup> Сибирский государственный индустриальный университет

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

<sup>3</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

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

**Аннотация.** Накопленные в отвалах и шламонакопителях предприятий металлургического комплекса отходы, включая отходы подготовки сырья (добычи, обогащения агломерирования и др.), металлургического передела и смежных производств, могут служить сырьем для предприятий различных отраслей и, прежде всего, черной металлургии. Тенденция снижения запасов железной руды делает особенно актуальной переработку техногенных отходов с целью получения техногенного железорудного сырья. Более 50 лет складываются отходы (порода углеобогащения, зола от сжигания углей на ТЭЦ и ПВС, шламы систем газоочистки металлургических агрегатов и др.) от различных производств в шламонакопителе Западно-Сибирского металлургического комбината. В связи с окончанием срока эксплуатации шламонакопителя необходима разработка технологии переработки накопленных техногенных отходов. С целью оценки перспектив получения железоконцентратов из основных видов размещенных в шламонакопителе отходов проведен комплекс исследований минерального состава и кристаллохимической структуры железосодержащих минералов с использованием методов мессбауэровской спектроскопии, рентгенофазового и химического анализов, оптической микроскопии. Выявлены существенные различия в формах нахождения железа в отходах, имеющих различное происхождение, что обуславливает специфику технологий их переработки.

**Ключевые слова:** металлургический комплекс, техногенные отходы, минералы, структура, железо.

**DOI:** 10.15825/0368-0797-2015-5-359-366

Накопленные в отвалах и шламонакопителях предприятий металлургического комплекса отходы, включая отходы подготовки сырья (добычи, обогащения, агломерирования и др.), металлургического передела и смежных производств, могут служить сырьем для предприятий различных отраслей и, прежде всего, черной металлургии. Тенденция снижения запасов железной руды делает особенно актуальной переработку техногенных отходов с целью получения техногенного железорудного сырья [1 – 5].

В шламонакопителе ОАО «ЕВРАЗ объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» («ЕВРАЗ ЗСМК») более 50 лет складываются отходы от различных производств: порода углеобогащения, зола от сжигания углей на ТЭЦ и ПВС, шламы систем газоочистки металлургических агрегатов и др. В связи с окончанием срока эксплуатации шламонакопителя необходима разработка технологии переработки накопленных техногенных отходов. Наибольший интерес

для черной металлургии представляет извлечение из отходов железа и получение техногенного железосодержащего концентрата.

С учетом различного происхождения накопленных в шламонакопителе отходов технологии получения концентрата могут существенно различаться в зависимости от особенностей минерального состава и кристаллохимической структуры железосодержащих минералов.

Целью настоящей работы является оценка возможности и методов извлечения железа из накопленных в шламонакопителе отходов.

В работе проведены исследования отходов шламонакопителя с использованием методов мессбауэровской спектроскопии, рентгенофазового и химического анализов, оптической микроскопии.

Шламонакопитель «ЕВРАЗ ЗСМК» представляет собой гидротехническое сооружение намывного типа, по периметру которого кольцевым способом производится намыв так называемых «пляжей». Контуры вторичной

ограждающей дамбы ограничены пикетами (ПК) от ПК0 до ПК52 [6], протяженность пикета 100 м.

Для исследований были отобраны пробы, характеризующие основные виды накопленных в шламонакопителе отходов:

- 1 – проба ПК34 отобрана в районе пикета ПК34 с территории пляжа, намытого из отходов углеобогащения, которые составляют 77 % от общей массы накопленных отходов;
- 2 – проба ПК52 отобрана в районе пикета ПК52 с пляжа, намытого из золошлаковых отходов от сжигания угля Западно-Сибирской ТЭЦ, составляющих 17 % от массы накопленных отходов;
- 3 – проба ПК11 отобрана в районе пикета ПК11 с пляжа, намытого из железосодержащих шламов газоочисток доменного и конвертерных цехов, составляющих около 5 % от массы накопленных отходов [7].

В табл. 1 представлены результаты химического анализа исследуемых проб.

Пробы, отобранные в районе размещения отходов переработки угля ПК34 и ПК52, характеризуются типичным алюмосиликатным составом: 42,59 и 44,39 % SiO<sub>2</sub> и 9,74 и 14,32 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> соответственно. Однако эти отходы характеризуются достаточно высоким содержанием железа: 10,11 % в отходах углеобогащения, 14,15 % в отходах от сжигания угля. Проба ПК11 содержит 59,74 % Fe, что сопоставимо с содержанием железа в богатых рудах. Во всех пробах обнаружено металлическое железо. При этом наибольшая его концентрация найдена в пробе ПК11 – 12,28 %, что, вероятно, связано с преобладанием в пробе конвертерных шламов, в составе которых содержатся частицы вынесенного из конвертеров металла. Содержание металлического железа в пробах ПК34 и ПК52 составляет 0,71 и 0,57 %, что может быть связано с заносом в районы выпусков железшламов.

В результате химического анализа установлено, что в отходах углеобогащения железо содержится преимуще-

ственно в двухвалентном состоянии (92,3 % (здесь и далее отн.)), в отходах от сжигания угля – в трехвалентном состоянии (76,3 %), а в железшламах железо распределено более равномерно между металлическим (20,6 %), двухвалентным (30,2 %) и трехвалентным (49,2 %) состояниями, при преобладании последнего. В целом, по результатам химического анализа все исследуемые пробы представляют интерес с точки зрения извлечения железа.

В табл. 2 представлены результаты рентгенофазового анализа проб, выполненного на дифрактометре Дрон-2.0. Установлено, что в пробе железо содержится, главным образом, в составе сидерита, а преобладают гидромусковит (группа гидрослюд) и кварц. В пробе ПК52 преобладает рентгеноаморфное вещество (вероятно, остеклованные силикаты), а железо содержится, главным образом, в составе магнетита, при небольшом содержании примесей гематита и сидерита. В пробе ПК11 железо содержится в составе следующих соединений: магнетит FeO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, гематит α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, вюстит FeO, металлическое железо α-Fe; преобладает магнетит.

Для выяснения фазового состава отходов, магнитного состояния компонентов и валентных форм железа был использован метод мессбауэровской спектроскопии (спектрометр Ms 1104 Em с источником Co<sup>57</sup> в матрице родия), спектры обрабатывали с помощью программы «Univem Ms» (Южный федеральный университет, Ростов-на Дону). Изомерный сдвиг (δ) рассчитывали относительно α-Fe. Результаты исследований представлены на рис. 1 и в табл. 3 (где *H* – магнитное поле на ядрах Fe<sup>57</sup>; Δ – квадрупольное расщепление; *S* – площадь компонент; *P* – пропускание, отн. ед.; *V* – скорость движения источника гамма-квантов; *N* – количество импульсов в каналах).

Мессбауэровский спектр железосодержащего шлама (проба ПК11) (рис. 1, а) был разложен на четыре секстета и два дублета. Секстет С1 в соответствии

Т а б л и ц а 1

**Химический состав проб из шламонакопителя «ЕВРАЗ ЗСМК»**

*Table 1. Chemical composition of the samples from sludge collector of OJSC “EVRAZ ZSMK”*

Проба	Содержание, % сухой массы																
	ППП	Fe <sub>общ</sub>	$\frac{Fe_{мет.}}{доля от Fe_{общ} \%}$	$\frac{Fe^{2+}}{доля от Fe_{общ} \%}$	$\frac{Fe^{3+}}{доля от Fe_{общ} \%}$	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	ZnO	PbO
ПК34	13,4	10,11	$\frac{0,71}{7,00}$	$\frac{9,33}{92,3}$	$\frac{0,07}{0,7}$	9,74	3,65	42,59	0,70	0,99	0,16	0,35	0,52	1,91	0,82	0,024	0
ПК52	1,19	14,15	$\frac{0,57}{4,0}$	$\frac{3,60}{19,7}$	$\frac{15,39}{76,3}$	14,32	6,79	44,39	0,30	2,86	0,32	0,12	0,65	1,72	0,92	0,020	0
ПК11	1,76	59,74	$\frac{12,28}{20,6}$	$\frac{23,17}{30,2}$	$\frac{41,98}{49,2}$	3,65	7,86	7,39	0,73	1,97	0,16	0,19	0,39	0,10	0,77	0,340	0,0016

## Результаты рентгенофазового анализа проб из шламонакопителя

Table 2. The results of X-ray diffraction analysis of the samples from the sludge collector

Проба	Основные фазы	Второстепенные фазы	Примеси
ПК34	Гидромусковит, сидерит $\text{FeCO}_3$ , кварц	Гидрослюда, монтмориллонит, рентгеноаморфное вещество (РА)	Кальцит, полевоый шпат, каолинит или хлорит, доломит, графит (углерод)
ПК52	РА	Магнетит $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , кварц	Полевоый шпат, кальцит, гематит, сидерит
ПК11	Магнетит $\text{Fe}_3\text{O}_4$	Гематит $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , вюстит $\text{FeO}$ , $\alpha\text{-Fe}$	Кальцит, кварц

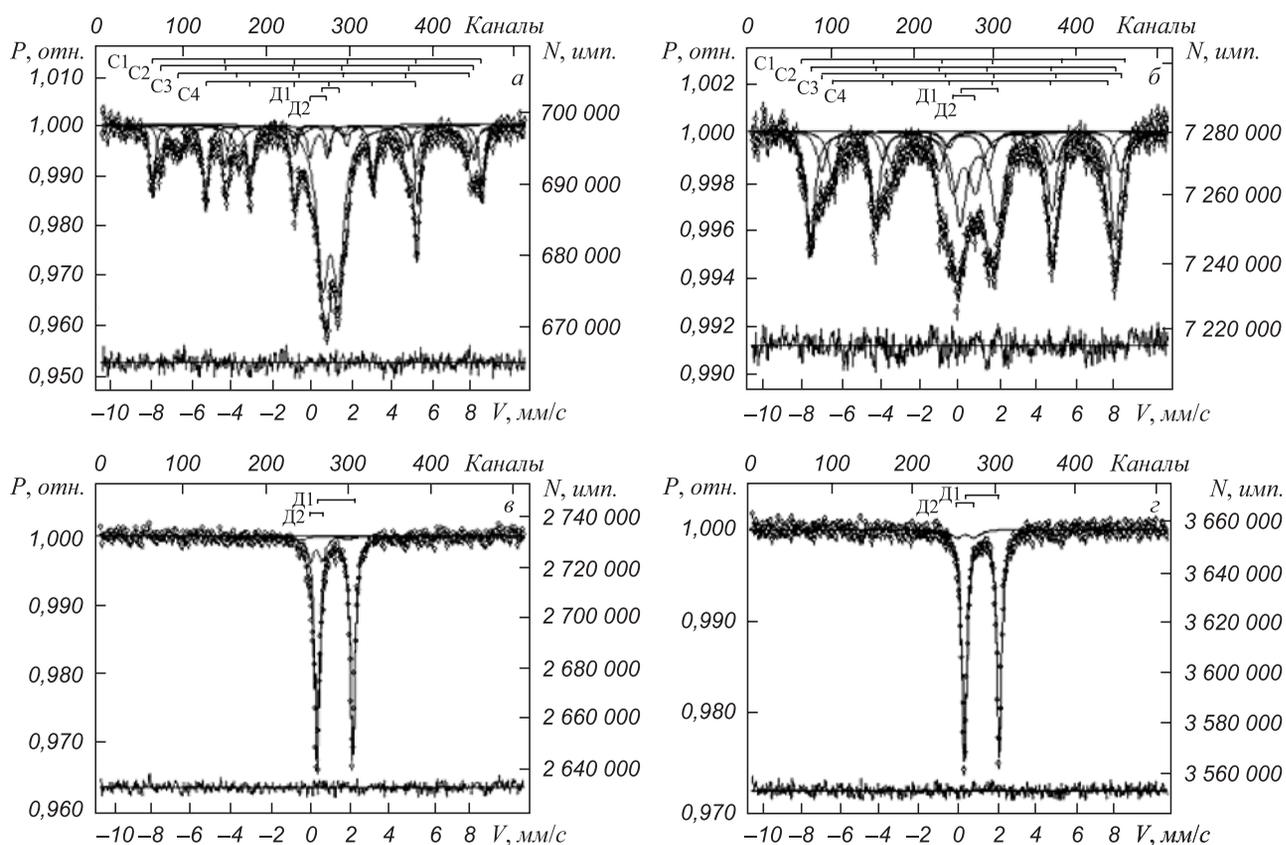


Рис. 1. Мессбауэровские спектры:  
 а – железосодержащий шлам (проба ПК11); б – зола от сжигания угля (проба ПК52);  
 в и г – отходы углеобогащения (пробы ПК34-1 и ПК34-2)

Fig. 1. Mössbauer spectra:  
 а – iron-containing sludge (PK11 sample); б – ash from coal firing (PK52 sample); в and г – waste coal (PK34-1 and PK34-2 samples)

с изомерным сдвигом, согласно данным работы [8], квадрупольным расщеплением и магнитным полем на ядрах  $\text{Fe}^{57}$  соответствует антиферромагнитному гематиту. Секстеты С2 и С3 соответствуют ферромагнитному магнетиту, причем секстет С2 обусловлен ионами  $\text{Fe}^{3+}$  тетраэдрической позиции, а С3 – ионами  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  октаэдрической позиции, которые связаны электронным обменом. Поскольку в стехиометрическом магнетите отношение заселенности тетраэдрической позиции к заселенности октаэдрической равно 0,5, то

и отношение площадей секстета С2 к С3 ( $S_A/S_B$ ) должно быть равно 0,5. Если это соотношение нарушается, то в магнетите присутствуют изоморфные примеси или магнетит представляет собой член ряда магнетит-маггемит. В рассматриваемом случае отношение площадей составляет 0,57, из чего следует, что в магнетите присутствуют изоморфные примеси или он нестехиометрический. Секстет С4 с близкими к нулю изомерным сдвигом и квадрупольным расщеплением относится к ферромагнитному металлическому железу. Дублет Д1

**Мессбауэровские параметры спектров и их интерпретация**

*Table 3. Mössbauer spectra parameters and their interpretation*

Проба	Компонента спектра	$\delta$ , мм/с	$\Delta$ , мм/с	$H$ , кЭ	$S$ , %	Интерпретация
ПК11	C1(Fe <sup>3+</sup> )	0,37	-0,18	514	14,8	Гематит ( $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
	C2(Fe <sup>3+</sup> )	0,31	-0,03	489	9,3	Магнетит (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )
	C3(Fe <sup>2+</sup> + Fe <sup>3+</sup> )	0,58	-0,07	453	16,3	
	C4(Fe)	0,00	-0,01	330	18,5	$\alpha$ -Fe
	Д1(Fe <sup>2+</sup> )	0,94	0,78	0	36,9	Вюстит (FeO)
	Д2(Fe <sup>3+</sup> )	0,35	0,84	0	4,2	Т/д оксид Fe
ПК52	C1(Fe <sup>3+</sup> )	0,37	-0,21	516	0,7	Гематит( $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )
	C2(Fe <sup>3+</sup> )	0,27	-0,04	484	36,8	Магнетит (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )
	C3(Fe <sup>2+</sup> + Fe <sup>3+</sup> )	0,63	0,06	474	13,8	
	C4(Fe <sup>2+</sup> + Fe <sup>3+</sup> )	0,63	-0,06	436	15,1	
	Д1(Fe <sup>2+</sup> )	1,06	1,91	0	20,7	Сидерит (FeCO <sub>3</sub> )
	Д2(Fe <sup>3+</sup> )	0,32	1,15	0	13,0	$\Sigma$ Fe <sup>3+</sup>
ПК34-1	Д1(Fe <sup>2+</sup> )	1,23	1,78	0	87,5	Сидерит (FeCO <sub>3</sub> )
	Д2(Fe <sup>2+</sup> )	0,29	0,61	0	12,5	Пирит (FeS <sub>2</sub> )
ПК34-2	Д1(Fe <sup>2+</sup> )	1,23	1,78	0	93,5	Сидерит (FeCO <sub>3</sub> )
	Д2(Fe <sup>2+</sup> )	0,26	0,60	0	6,5	Пирит (FeS <sub>2</sub> )

от ионов Fe<sup>2+</sup> по параметрам соответствует парамагнитному вюститу, а дублет Д2 от ионов Fe<sup>3+</sup> – тонкодисперсному (суперпарамагнитному) оксиду железа.

Мессбауэровский спектр золы от сжигания угля, как и спектр пробы ПК10, был разложен на четыре секстета и 2 дублета. Секстет С1 с параметрами, присущими гематиту, проявляется почти на уровне ошибки измерения. Секстет С2 обусловлен ионами Fe<sup>3+</sup> тетраэдрической позиции магнетита, а секстеты С3 и С4 – от неэквивалентных положений ионов железа октаэдрической позиции. Наличие двух секстетов можно объяснить значительной нестехиометрией магнетита, поскольку  $S_A/S_B = 1,27$ , а содержание возможных изоморфных примесей не может обеспечить такого отношения. Дублет Д1 относится к парамагнитному сидериту, а Д2, видимо, суперпозиционный за счет Fe<sup>3+</sup> тонкодисперсных оксидов железа и железосодержащих силикатов.

Мессбауэровские спектры двух проб отходов обогащения угля (ПК34-1 и ПК34-2) показаны на рис. 1, а, б. Установлено, что мессбауэровский спектр состоит из интенсивного дублета Д1 от Fe<sup>2+</sup>, который по изомерному сдвигу и квадрупольному расщеплению соответствует сидериту. Дублет Д2 в этом спектре можно связать с парамагнитным пиритом, поскольку параметры довольно близки.

Таким образом, результаты исследований методом мессбауэровской спектроскопии в целом подтвердили результаты рентгенофазового и химического анализов и позволили получить более точные данные о видах и содержании железосодержащих фаз в исследуемых

пробах. При приравнивании площади компонент к относительному содержанию железа получим, что в отходах углеобогащения (проба ПК34) железо содержится в двухвалентном состоянии, преимущественно, в составе сидерита (87,5 и 93,5 %) и в составе пирита. В золе от сжигания угля (проба ПК52) железо содержится преимущественно в трехвалентном состоянии, однако в разных фазах: основная доля – в составе магнетита, 13,0 % – в составе тонкодисперсных оксидов железа и железа силикатов, и только 0,7 % – в составе гематита. Двухвалентное железо входит в состав магнетита и сидерита (20,7 %). Главным железосодержащим веществом в золе от сжигания угля является магнетит, в составе которого содержится 65,7 % железа. В железшламах, представляющих собой, главным образом, смесь доменного и конвертерного шламов при преобладании последнего, 18,5 % железа содержится в металлической форме, 25,6 % железа входит в состав магнетита, 36,9 % – в состав вюстита, 14,8 % – в состав гематита, 4,2 % представлено тонкодисперсными оксидами железа.

В целом исследования различными методами показали довольно близкие результаты. Высокая суммарная доля железа в составе сильномагнитных железосодержащих фаз (ферромагнетик – магнетит, ферромагнетик –  $\alpha$ -Fe) в железшламах (44,1 %) и золе от сжигания углей (65,7 %) обуславливает возможность использования для его извлечения магнитных методов обогащения. Для извлечения железа также могут быть применены магнитные методы при условии предварительного магнетизирующего обжига отходов углеобогащения с

целью разложения и перевода в магнетит железа, входящего в состав сидерита и пирита [9].

Однако эффективность извлечения железа из отходов с применением магнитных методов в значительной степени зависит от того, в каком виде находятся в них железосодержащие вещества: в раскрытом (мономинеральном) или в виде сростаний с другими веществами. С целью выявления форм нахождения железа в составе различных фаз проведены петрографические исследования отходов на поляризационном оптическом микроскопе ЛабоПол-2 в проходящем свете. Отходы исследовали в аншлифах, приготовленных из тонкодисперсных агрегатов и цементированных эпоксидной смолой. Исследования сопровождали фотографированием на цифровую камеру типичных или технологически интересных структур и текстур через микрофотонасадки МФНЭ-1.

На рис. 2 и 3 представлены фотографии микроструктуры пробы железосламов. Исследования показали, что проба состоит из тонких угловатых обломков размером 0,001 – 0,010 мм и изометричных сферических частиц размерами 0,03 – 0,07 мм. Большинство частиц шлама представлено металлическим железом (ферритом). Некоторые обломки рудного вещества образованы вюститом, магнетитом с прорастаниями вюstitа и магнетитом. На рис. 2, *a, б* отчетливо видны обломки вюstitа и обломки, состоящие из металлического железа, магнетита и силикатного стекла. На рис. 2, *в* вокруг королек металлического железа наблюдается оболочка из очень мелких частиц железа и магнетита (светло-серые точки), притянутых к королюку его магнитным

полем. В правом нижнем секторе (рис. 2, *в*) виден раздробленный кусок вюstitа с микровключениями металлического железа; в верхнем правом секторе виден нерудный сферолит с очень тонкой концентрической зоной из рудных, очевидно, магнетитовых кристаллов; в левом секторе видны чешуйчатые скопления, состоящие из магнетита, вюstitа и металлического железа. На рис. 2, *г* (в иммерсии) видно, что вокруг короляка металлического железа нарастает сегмент вюstitового короляка.

На рис. 3, *a* видно, что массивно-скелетный вюstit в королюке цементирован шлаковым стеклом, рядом – чешуйчатый обломок магнетита. На рис. 3, *б* виден королек металлического железа, по периферии облепленный вюstitом, чешуйчатые осколки вюstitа; на рис. 3, *в* видно срастание металлического железа с массивно-скелетным вюstitом. На рис. 3, *г* видно срастание металлического железа с тонко-скелетным вюstitом, в котором силикатное стекло преобладает над содержанием вюstitа. Таким образом, основная часть железосламов представлена достаточно чистыми железосодержащими минералами, в частности, королюками металлического железа, мелкими частицами магнетита, гематита и вюstitа, что, очевидно, обеспечит достаточно высокую эффективность их магнитного извлечения при обогащении.

На рис. 4 представлены фотографии микроструктуры пробы ПК52, выполненные с применением иммерсионной жидкости (кедровое масло). Частицы пробы представляют преимущественно сферолиты: зональный сферолит, состоящий из магнетита и стекла

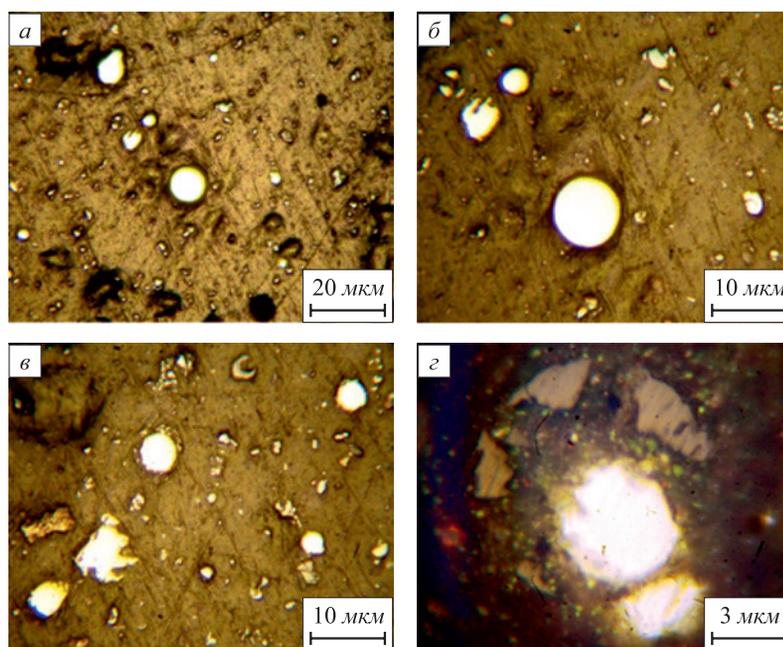


Рис. 2. Фотографии различных участков (*a – г*) пробы ПК11 (железосламы) в иммерсии (королюки металлического железа – ярко-белые, вюstit – светло-серый, магнетит – серый)

Fig. 2. The pictures of different sections (*a – г*) of PK11 sample (iron sludge) in immersion (goldcrests of metallic iron – bright white, wustite – light-grey, magnetite – grey)

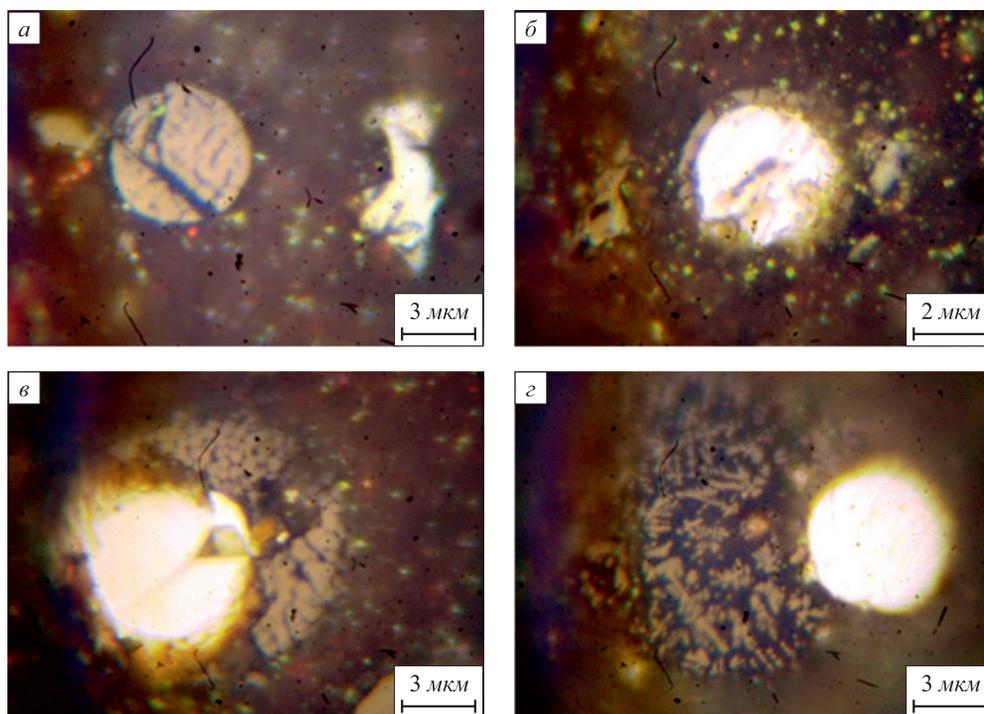


Рис. 3. Фотографии различных участков (*a – г*) пробы ПК11 в иммерсии (металлическое железо – ярко-белое, вюстит – светло-серый)

Fig. 3. The pictures of different sections (*a – г*) of PK11 sample in immersion (metallic iron – bright-white, wustite – light-grey)

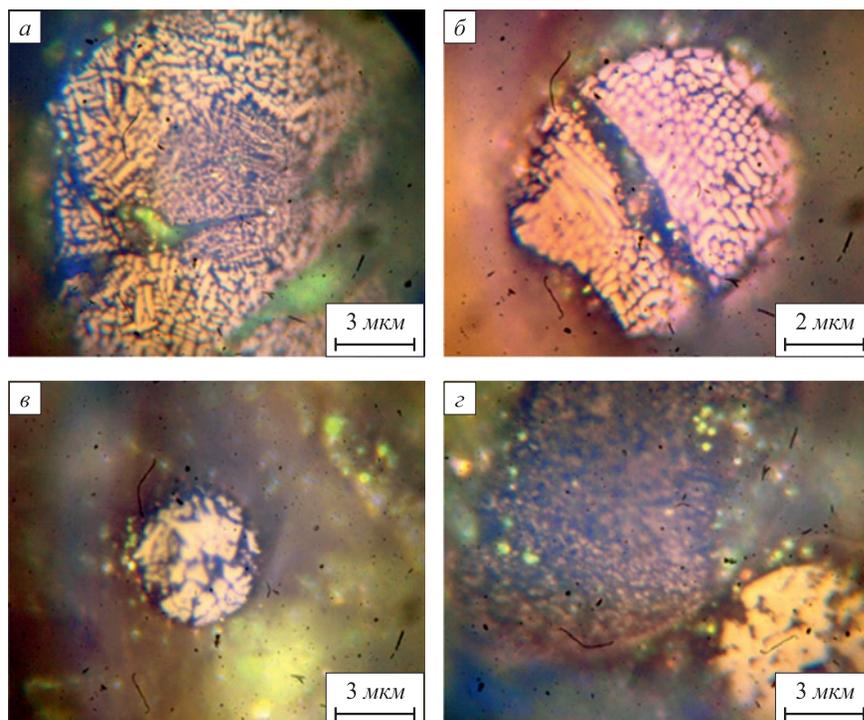


Рис. 4. Фотографии различных участков (*a – г*) пробы ПК52 (зола от сжигания угля) в иммерсии (гематит – белый, магнетит – светло-серый, вюстит – светло-серый, стекло – черное, силикаты – серые точки)

Fig. 4. The pictures of different sections (*a – г*) of PK52 sample (ash from coal firing) in immersion (hematite – white, magnetite – light-grey, wustite – light-grey, glass – black, silicates – gray spots)

(рис. 4, *a*); вюстит в стеклянном сферолите (рис. 4, *б*); сферолит, состоящий из вюstitа, магнетита и стекла (рис. 4, *в*); два слипшихся сферолита, маленький со-

стоит из массивно-скелетного магнетита с тонкими включениями гематита, крупный в основном состоит из силикатного стекла с мелкими зародышевыми

кристаллами магнетита и силикатов (рис. 4, *з*). Таким образом, представленная структура пробы ПК52 свидетельствует о том, что железосодержащие вещества (магнетит, вюстит, гематит) находятся внутри стеклянных сферолитов, что снижает эффективность их извлечения магнитным способом и обуславливает необходимость предварительного измельчения отходов с целью разрушения сферолитов.

Отходы углеобогащения представлены полуокатанными обломками углистых алевролитов, углистых аргиллитов, сферосидеритов и углистых частиц в сростании с породами, в обломках наблюдаются включения пирита и марказита (рис. 5).

Углистый аргиллит, углистые частицы в отраженном свете имеют желтовато-светло-серый цвет, в некоторых частицах углистого аргиллита наблюдаются микровключения растительного детрита, кутикулы семян и частицы листьев (рис. 5, *а*). Угловатый обломок углистого аргиллита, нерудные включения представлены зернами кварца и аргиллитовыми сферолитами (рис. 5, *б*). В целом отходы углеобогащения представлены полуокатанными обломками углистых алевролитов и аргиллитов, сферосидеритов и углистых частиц в сростании с породами и включениями пирита и марказита. Очевидно, что для извлечения железа из отходов углеобогащения необходимо, прежде всего, разрушить сростки железосодержащих фаз (сидерит, пирит, марказит) с углистыми частицами, а также перевести железо из немагнитного или слабомагнитного состояния в сильномагнитное. Этого можно достигнуть при применении магнетизирующего обжига отходов углеобогащения в слабоокислительной или нейтральной среде, в процессе которого произойдет термическое разложение сидерита с образованием вюstitа и углекислого газа и последующее окисление вюstitа до магнетита. Углерод отходов обеспечит процесс обжига собственным теплом, а в условиях недостатка кислорода пирит окислится до магнетита. Продукты магнетизирующего обжига, обогащенные магнетитом, являются сырьем для последующего магнитного обогащения сухим или мокрым способом.

**Выводы.** Отходы, накопленные в шламонакопителе «ЕВРАЗ ЗСМК», несмотря на различное происхождение и состав (отходы от обогащения и сжигания углей, шламы газоочисток доменного и конвертерных цехов) представляют интерес с точки зрения извлечения железа. В результате комплекса проведенных физико-химических и минералогических исследований выявлены существенные различия в свойствах и формах нахождения железа в различных видах отходов шламонакопителя «ЕВРАЗ ЗСМК». Шламы представлены, главным образом, железосодержащими фазами, включая сильномагнитные (магнетит, металлическое железо) и слабомагнитные (гематит, вюстит, тонкодисперсный трехвалентный оксид железа), что обуславливает целесообразность их магнитного обогащения. Главной

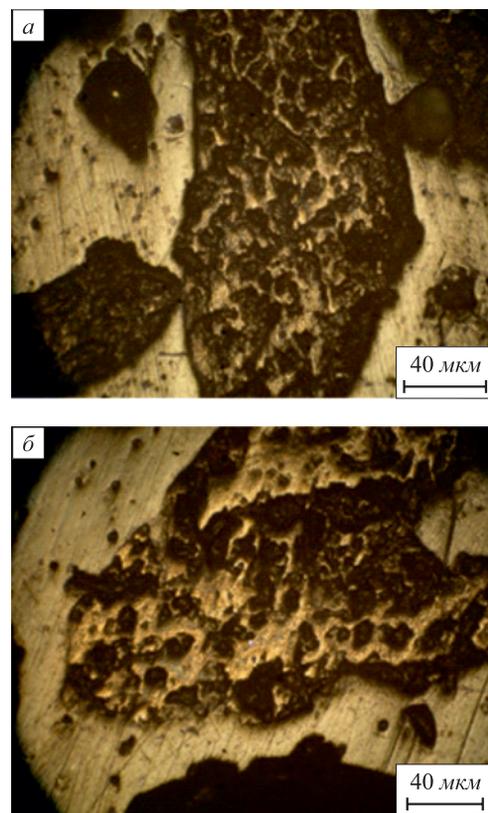


Рис. 5. Фотография различных участков (*а*, *б*) пробы ПК34 (отходы углеобогащения) (углистые частицы – черные, сидерит, пирит, марказит – светло-серые)

Fig. 5. The pictures of different sections (*a*, *b*) of PK34 sample (waste coal) (coaly particles – black ones, siderite, pyrite, marcasite – light-grey ones)

железосодержащей фазой в золе от сжигания угля является магнетит, однако он находится внутри стеклянных (силикатных) сферолитов, что снижает эффективность его извлечения магнитным способом и обуславливает необходимость предварительного измельчения отходов с целью разрушения сферолитов. В отходах углеобогащения железо содержится преимущественно в составе сидерита, а также пирита и марказита, которые находятся в сростании с углистыми частицами. Для извлечения железа целесообразно использовать магнитную сепарацию с предварительным восстановительным обжигом, приводящим к выгоранию углистых частиц, разрушению сростков, разложению карбонатов и сульфидов железа с образованием магнетита.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юсфин Ю.С., Леонтьев Л.И., Черноусов П.И. Промышленность и окружающая среда. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 469 с.
2. Макаров А.Б. Техногенные месторождения минерального сырья // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. № 8. С. 76 – 80.
3. Коняев В.П., Крючкова Л.А., Туманова Е.С. Техногенное минеральное сырье России и направление его использования. Инф. сб. – М., 1994. Вып. 1. С. 42, 43.

4. Усанова Т.В., Рихванов Л.П. К проблеме техногенных месторождений Сибири. – В кн.: Материалы региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и северо-востока России. Т. 2. – Томск: изд. Томского политехн. ун-та, 2000. С. 61 – 63.
5. Антоненко Л.К., Зотеев В.Г. Проблемы переработки и захоронения отходов горно-металлургического производства // Горный журнал. 1999. № 2. С. 70 – 72.
6. Вольнкина Е.П. Исследование закономерностей формирования техногенного месторождения на территории шламонакопителя ОАО «ЗСМК» // Вестник РАЕН. 2006. Т. 6. № 3. С. 86 – 93.
7. Вольнкина Е.П., Зоря В.Н. Исследование способов обогащения отходов шламонакопителя ОАО «Западно-Сибирский металлургический комбинат» // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 4. С. 60 – 64.
8. Menil F. Systematic trends of  $^{57}\text{Fe}$  Mössbauer isomer shifts in  $(\text{FeO}_n)$  and  $(\text{FeF}_n)$  polyhedra. Evidence of a new correlation between the isomer shift and the inductive effect of the competing bond  $T-X$  ( $-Fe$ ) (where  $X$  is O or F and  $T$  element with a formal positive charge) // J. Phys. and Chem. Solids. 1985. Vol. 46. № 7. P. 763 – 789.
9. Мухтар А.А., Бентурганов Н.С., Коровушкин В.В., Вернер И.А. Исследование продуктов обжига бурожелезняковых концентратов методами ЯГРС и термомагнитного анализа // Обогащение руд. 2011. № 3. С. 28 – 30.

Поступила 3 февраля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 5, pp. 359–366.

## THE RESEARCH OF THE MINERAL COMPOSITION AND CRYSTAL STRUCTURE OF IRON-CONTAINING COMPONENTS OF TECHNOGENIC WASTE OF THE METALLURGICAL COMPLEX

**Zorya V.N.**<sup>1,2</sup>, *Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.), Executive Director*

**Korovushkin V.V.**<sup>3</sup>, *Dr. of geological-mineralogical Sci., Leading expert of the Chair “Extraction and recycling of ferrous metals”, Professor*

**Permyakov A.A.**<sup>2</sup>, *Cand. of geological-mineralogical Sci., Professor-consultant of the Laboratory of ecology and complex usage of mineral wastes*

**Volynkina E.P.**<sup>2</sup>, *Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal power and Ecology”*

(ekaterina.volynkina@gmail.com)

<sup>1</sup> LLC «TekhResurs» (13-261, Ordzhonikidze str., Novokuznetsk, Kemerovo region, 654000, Russia)

<sup>2</sup> Siberian State Industrial University (42, Kirova str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654007, Russia)

<sup>3</sup> National University of Science and Technology «MISIS» (4, Leningradskii ave., Moscow, 119049, Russia)

**Abstract.** The accumulated wastes in the dumps and sludge collector of metallurgical enterprises, including the preparation of raw materials (mining, agglomeration, al.), metallurgical and related industries can be used as raw materials in various industries, and, above all, in the steel industry. The reduction tendency of iron ore storage makes the processing of industrial waste particularly urgent for production of man-made iron ore. In the sludge collector of the West Siberian Steel Plant (OJSC “EVRAS ZSMK”) for more than 50 years waste from different industries have been stored: coal washing rock, ash from burning coal of power plants, sludge of gas cleaning systems of metallurgical units. In connection with the termination of operation of the sludge collector the development of technology for the processing of the accumulated technological waste is the urgent task. In order to assess the prospects of producing of iron concentrates from the main types of waste placed in the sludge collectors, a complex study of the mineral composition and crystal structure of iron-bearing minerals has been carried out using Mössbauer spectroscopy, X-ray diffraction, as well as chemical analysis and optical microscopy. It has been revealed that significant differences in the location of iron in the waste from various origins lead to the specifics of their elaboration technologies.

**Keywords:** metallurgical complex, technogenic waste, minerals, structure, iron.

## REFERENCES

1. Yusfin Yu.S., Leont'ev L.I., Chernousov P.I. *Promyshlennost' i okruzhayushchaya sreda* [Industry and environment]. Moscow: IKT «Akademkniga», 2002. 469 p. (In Russ.).
2. Makarov A.B. Technogenic mineral raw material deposit. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal*. 2000, Vol. 6, no. 8, pp. 76–80. (In Russ.).
3. Konyaev V.P., Kryuchkova L.A., Tumanova E.S. *Tekhnogennoe mineral'noe syr'e Rossii i napravlenie ego ispol'zovaniya. Inf. Sb.* [Technogenic mineral raw material of Russia and the tendency of its usage. Inf. collection]. Moscow, 1994. Issue 1, pp. 42–43. (In Russ.).
4. Usmanova T.V., Rikhvanov L.P. On the issue of technogenic deposits of Siberia. In: *Materialy regional'noi konferentsii geologov Sibiri, Dal'nego Vostoka i severo-vostoka Rossii. Vol. 2* [Proceedings of the regional conference of geologists of Siberia, Far East and north-east of Russia. Vol. 2]. Tomsk: izd. Tomskogo politekhn. un-ta, 2000, pp. 61–63. (In Russ.).
5. Antonenko L.K., Zoteev V.G. Problems of processing and waste disposal of mining and smelting industry. *Gornyi zhurnal*. 1999, no. 2, pp. 70–72. (In Russ.).
6. Volynkina E.P. Research of formation regularities of technogenic deposit on the territory of the sludge collector of JSC «ZSMK». *Vestnik Rossiiskoi Akademii Estestvennykh Nauk*. 2006, Vol. 6, no. 3, pp. 86–93. (In Russ.).
7. Volynkina E.P., Zorya V.N. Research of the ways of waste enrichment of sludge collector of JSC «West Siberian metallurgical plant». *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 4, pp. 60–64. (In Russ.).
8. Menil F. Systematic trends of  $^{57}\text{Fe}$  Mössbauer isomer shifts in  $(\text{FeO}_n)$  and  $(\text{FeF}_n)$  polyhedra. Evidence of a new correlation between the isomer shift and the inductive effect of the competing bond  $T-X$  ( $-Fe$ ) (where  $X$  is O or F and  $T$  element with a formal positive charge). *J. Phys. and Chem. Solids*. 1985, Vol. 46, no. 7, pp. 763–789.
9. Mukhtar A.A., Benturaganov N.S., Korovushkin V.V., Verner I.A. Research of calcined products of brown clay iron concentrators by the methods of nuclear gamma resonance of thermomagnetic analysis. *Obogashchenie rud*. 2011, no. 3, pp. 28–30. (In Russ.).

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-359-366

Received February 3, 2015

УДК 669.046

## ПРИМЕНЕНИЕ ТАКТОВЫХ МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧАХ РЕИНЖИНИРИНГА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ В МЕТАЛЛУРГИИ

*Кулаков С.М., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой автоматизации  
и информационных систем*

*Мусатова А.И., доцент кафедры корпоративной экономики  
и управления персоналом (musatova-ai@yandex.ru)*

*Кадыков В.Н., к.т.н., доцент кафедры обработки металлов давлением  
и металловедения. ЕВРАЗ ЗСМК*

*Баранов П.П., д.э.н., доцент, директор института экономики и менеджмента*

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

**Аннотация.** Рассмотрена задача построения тактовых моделей функционирования сложных производственных систем и их применения в реинжиниринге объектов черной металлургии. Разработана классификация моделей тактов по их назначению, масштабу объекта исследования, степени непрерывности материального потока, количеству одновременно обрабатываемых полупродуктов, количеству производственных операций, важности оборудования, статистическим характеристикам такта, степени механизации и автоматизации оборудования, по входу и выходу материального потока. Показана ведущая роль показателя «производительность» и его связи с другими технико-экономическими показателями производственной системы. Приведена факторная модель производительности системы и выделен основополагающий фактор – такт системы. Предложена базовая формула для оценивания производительности на основе такта. Показана методика выявления «узких мест» производственной системы на базе тактового подхода и оценки эффективности мероприятий реинжиниринга. Приведен пример применения тактовых моделей для анализа «узких мест» в прокатном производстве. Отмечена возможность применения тактовых моделей для планирования, прогнозирования и оперативного управления производством.

**Ключевые слова:** производительность, производственная система, технико-экономические показатели, взаимосвязи, классификация, модели тактов, «узкое место» поточной системы, нормативная база.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-367-375

В современных условиях работы предприятия постоянно возникают вопросы инжиниринга (реинжиниринга) производственных систем (ПС), связанные с улучшением важнейшего показателя их эффективности – производительности, которая является основой формирования прибыли предприятия. Производственная система рассматривается как сложный целостный динамичный объект, конкретными примерами которого являются: предприятие, производственный комплекс, цех, участок. Эффективность функционирования такой системы обеспечивается совокупностью взаимосвязанных технических, технологических, материальных, кадровых и финансовых ресурсов, необходимых для своевременного выпуска и реализации продукции с целью получения максимальной прибыли [1, 2].

Производительность системы – широко известный термин, который в промышленности обычно связывают со средствами производства (производительность механизмов, машин, агрегатов), с предметами труда (производительность по видам продукции), с производственными процессами (производительность процесса), с трудом человека (производительность труда) и с про-

изводственной системой в целом. Все эти разновидности понятия «производительность» связаны между собой, дополняют друг друга и имеют единую основу, а именно – количество продукции (в единицах массы, объема, в штуках), произведенной за единицу времени (час, смену, сутки, месяц, год) [3, 4]. Иногда термин «производительность» заменяется на термин «выпуск продукции» или «производственная мощность». С точки зрения инжиниринга целесообразно производительность интерпретировать как индикатор эффективности функционирования человеко-технического комплекса, осуществляющего преобразование сырья, материалов, полуфабрикатов в готовые продукты.

Производительность ПС предлагается классифицировать в рамках следующего признакового пространства: область применения, единичный интервал времени, сортамент (виды) продукции, производственная ситуация. Производительность должна оцениваться на всех стадиях жизненного цикла системы (концептуальная проработка, проектирование, строительство, эксплуатация). На стадии проектирования рассчитывается проектная производительность ПС (теоретическая, технически возможная, нормативная) для разных единиц

времени (час, сутки, год) по каждому виду продукции и в среднем по сортаменту с учетом максимального (для теоретической и технически возможной производительности) и рационального (для нормативной производительности) использования оборудования. Для действующей ПС определяются производительности: фактическая (на основе отчетных, учетных и хронометражных данных), плановая, нормативная, технически возможная по каждому виду продукции и средневзвешенная по заданным видам продукции.

*Теоретическая производительность ПС* – выпуск продукции за единицу времени при идеальной безостановочной работе оборудования и непрерывной обработке материалов или полуфабрикатов. Она отражает только машинные возможности оборудования при условии, что вся система будет работать синхронизированно в автоматическом режиме.

*Технически возможная производительность ПС* – максимально возможный выпуск продукции за единицу времени (час, сутки) конкретного сортамента в условиях наилучшего использования оборудования и производственных площадей при наиболее совершенной технологии, организации производства и труда с учетом технически и технологически неизбежных пауз в работе системы.

*Нормативная производительность ПС* – выпуск продукции заданного сортамента за единицу времени, учитывающий не только технически и технологически неизбежные паузы в работе оборудования, но и скрытые простои, вызванные организационными и прочими факторами вероятностного характера.

*Плановая производительность ПС* – принятый в качестве задания выпуск продукции за единицу времени по отдельным ее видам или в среднем по сортаменту, получаемый обычно путем корректирования фактической производительности с учетом влияния организационно-технических условий планируемого периода. При стабильной работе системы в качестве плановой может быть принята нормативная производительность.

*Фактическая (отчетная) производительность ПС* соответствует достигнутому выпуску продукции в единицу времени при фактической структуре сортамента.

Показатель «производительность» ПС используется для решения задач: стратегического, календарного и оперативного производственного планирования; диспетчерского управления производством в изменяющейся ситуационной обстановке; анализа пропускной способности сложных многоструктурных производственных комплексов; планирования и корректировки показателей по труду; формирования нормативно-технического паспорта системы; оценивания коэффициентов трудности по видам продукции, необходимых при составлении сортаментных калькуляций и других нормативно-плановых документов; анализа и совершенствования показателей финансово-хозяйственной деятельности предприятия.

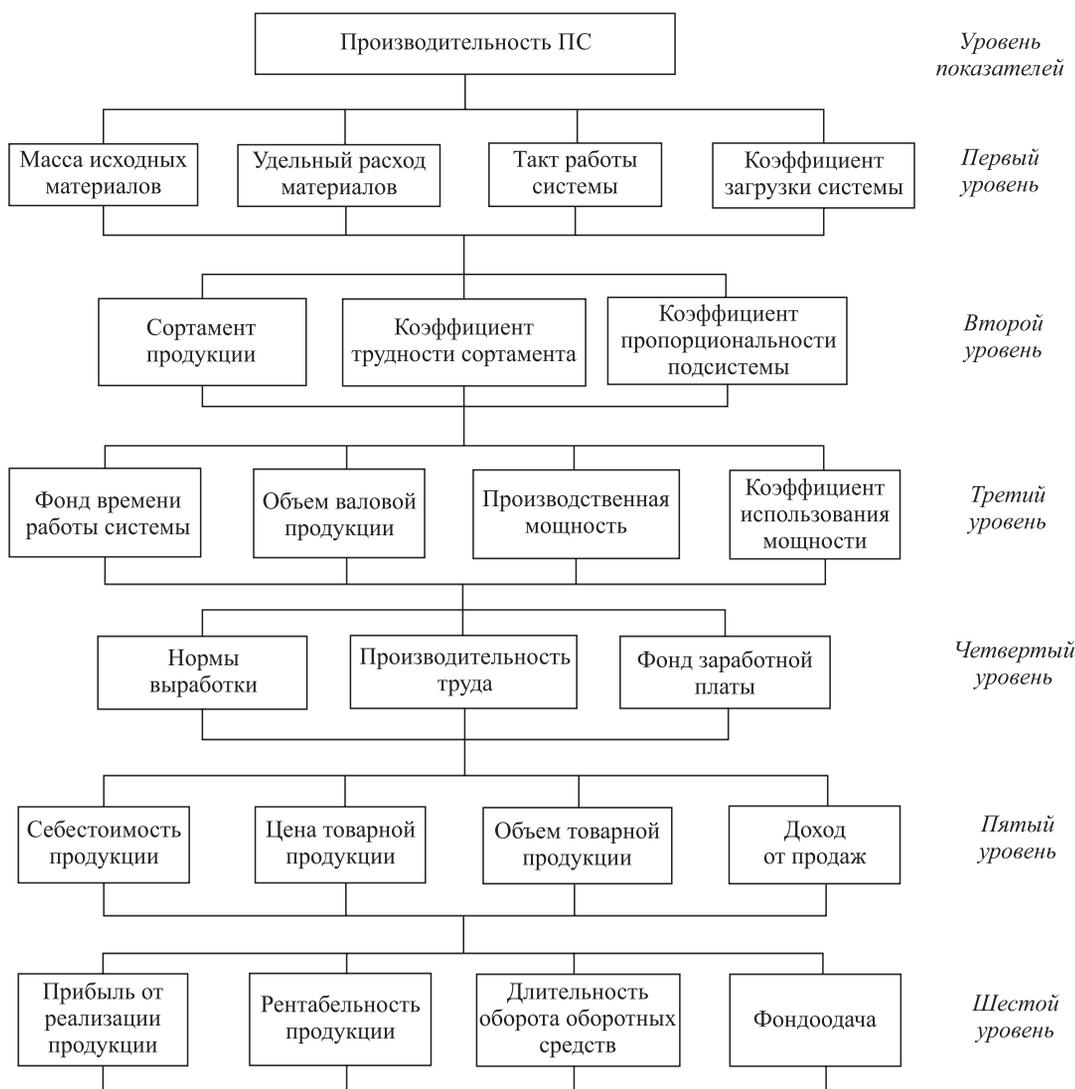
Производительность системы рассчитывается с учетом производственных ситуаций: планируемых, прогнозируемых или характерных для данной ПС, различающихся количеством одновременно работающего оборудования, возможными технологическими режимами и маршрутами, объемами заказов и номенклатурой продукции, организационно-техническими мероприятиями и другими факторами [5, 6]. На производительность влияет множество факторов (см. рисунок) как внешних по отношению к ПС, так и внутренних. Основными факторами являются такт  $T$ , масса  $G$  и удельный расход материалов  $k_p$ , загрузка оборудования  $K_n$ , фонд времени работы системы (ФВ) и сортамент продукции  $S$ :

$$P_{ПС} = f(T, G, k_p, K_n, \text{ФВ}, S). \quad (1)$$

*Такт* работы системы как основополагающий фактор производительности, на который в свою очередь оказывают влияние другие вышеперечисленные факторы, подробнее рассматривается далее.

*Масса* исходного материала, перерабатываемого за один такт, оказывает непосредственное влияние на производительность оборудования (подсистемы, системы). При оптимальном увеличении массы в пределах, обусловленных конкретными организационно-техническими условиями, обеспечивается наибольший рост производительности с учетом неизменности остальных факторов.

*Расходный коэффициент материала* (соответствующий обратному значению показателя выхода годной продукции) зависит от ряда условий: точности соблюдения технологических режимов, технического состояния оборудования, квалификационного уровня обслуживающего персонала, качества исходных материалов, степени организованности производственных процессов при функционировании всей системы и рациональности принимаемых руководством оперативных управленческих решений. Значение расходного коэффициента  $i$ -го материала может быть: теоретическим (идеальным)  $k_p^T = 1$ , когда предполагается, что нет каких-либо потерь материала; технически возможным  $k_p^{TB} > 1$ , когда учитываются технологически неизбежные потери материала, т.е.  $k_p^{TB} = k_p^T + \Delta k_p^{TB}$ ; нормативным  $k_p^H > 1$ , когда учитываются обоснованные дополнительные потери материала, т.е.  $k_p^H = k_p^T + \Delta k_p^{TB} + \Delta k_p^H$ ; плановым, когда корректируются потери материала, связанные со сложившимися производственными ситуациями, т.е.  $k_p^{Пл} = k_p^H + \Delta k_p^{Пл}$ , а в остальных случаях  $k_p^{Пл} = k_p^H$ . Фактическое значение расходного коэффициента ( $k_p^Ф$ )  $i$ -го материала отражает как технологически неизбежные потери, так и потери, образующиеся при отклонениях технологических режимов, технического состояния оборудования и оперативном управлении производственными процессами. При этом возможны следующие варианты соотношений фактических значе-



Взаимосвязи производительности системы с другими технико-экономическими показателями

Correlations of system capacity with other engineering-and-economic performances

ний расходных коэффициентов, характеризующих уровень экономической эффективности действующей ПС:  $k_p^\phi = k_p^H$ ,  $k_{np}^\phi = k_{np}^{пл}$ ;  $k_p^\phi > k_p^H$ ,  $k_{np}^\phi > k_{np}^{пл}$ .

В тесной связи с производительностью ПС находятся коэффициенты *трудности* ( $k_{тр}$ ), *пропорциональности* ( $k_{пр}$ ), *использования оборудования* ( $K_{и}$ ):

$$k_{тр} = \frac{P_o}{P_i}; k_{пр} = \frac{P_{вс}}{P_{гл}}; K_{и}^\phi = \frac{P_{пс}^\phi}{P_{пс}^{тв(н)}}; K_{и}^H = \frac{P_{пс}^H}{P_{пс}^{тв}}. \quad (2)$$

Коэффициенты трудности (сложности) производства продукции рассчитываются исходя из производительности ПС по основной типопредставительной продукции  $P_o$  по отношению к остальным видам продукции  $P_i$ . Коэффициенты пропорциональности определяются как отношение производительности вспомогательных подсистем ( $P_{вс}$ ) к производительности основной ведущей подсистемы ( $P_{гл}$ ). Фактический коэффициент интенсивного использования оборудования

(подсистемы, ПС), определяется отношением отчетной производительности к технически возможной ( $P_{пс}^{тв}$ ) или нормативной ( $P_{пс}^H$ ) производительности ПС.

Сопоставление фактических коэффициентов использования оборудования с нормативными дает возможность анализировать фактический фонд времени работы ПС, выявлять реальные паузы, задержки (скрытые простои), не учитываемые в отчетной документации, определять «чистое» время работы подсистем и системы в целом для разработки организационно-технических мероприятий, направленных на сокращение или ликвидацию простоев.

Производительность зависит от *сортамента выпускаемой продукции*, от возникающих в период функционирования ПС производственных ситуаций, связанных с технологией, техникой, качеством сырья и материалов, с маршрутами материальных потоков, с количеством работающего оборудования в каждой подсистеме.

Производительность системы является одним из главных факторов при определении показателей *объема производства* (производственной мощности, валовой, товарной, реализованной продукции) и связанных с ними показателями: производительность труда, трудоемкость продукции, уровень заработной платы персонала; фондоотдача, скорость и длительность оборота оборотных средств; себестоимость, прибыль и рентабельность продукции.

Производительность системы с последовательной структурой подсистем, как правило, определяется через их производительности  $P_{\text{ппс1}}, P_{\text{ппс2}}, \dots, P_{\text{ппс}\gamma}$ , по формуле

$$P_{\text{пс}} = \min \left\{ P_{\text{ппс1}} = \frac{G_{\text{ппс1}}}{T_{\text{ппс1}} k_p^{\text{ппс1}}}; P_{\text{ппс2}} = \frac{G_{\text{ппс2}}}{T_{\text{ппс2}} k_p^{\text{ппс2}}}; \dots; P_{\text{ппс}\gamma} = \frac{G_{\text{ппс}\gamma}}{T_{\text{ппс}\gamma} k_p^{\text{ппс}\gamma}} \right\}, \quad (3)$$

которая может быть эквивалентно преобразована в выражение, где расходные коэффициенты для подсистем представлены в мультипликативном виде ( $k_p^{\text{ппс1}} k_p^{\text{ппс2}} \dots k_p^{\text{ппс}\gamma} = k_p^{\text{пс}}$ ):

$$P_{\text{пс}} = \min \left\{ P_{\text{ппс1}} = \frac{G_{\text{ппс1}}}{T_{\text{ппс1}} k_p^{\text{ппс1}}}; P_{\text{ппс2}} = \frac{G_{\text{ппс1}}}{T_{\text{ппс2}} k_p^{\text{ппс1}} k_p^{\text{ппс2}}}; \dots; P_{\text{ппс}\gamma} = \frac{G_{\text{ппс1}}}{T_{\text{ппс}\gamma} k_p^{\text{пс}}} \right\}. \quad (4)$$

Основным недостатком расчета производительности ПС по формулам (3), (4) является необходимость предварительной оценки производительности каждой подсистемы, при вычислении которой возникают трудности не только с определением тактов работы подсистем  $T_{\text{ппс1}}, T_{\text{ппс2}}, T_{\text{ппс}\gamma}$ , но и с получением достоверных данных о расходных коэффициентах подсистем.

Для упрощения расчета предлагается оценивать производительность сложной производственной системы без предварительных расчетов производительностей подсистем и соответствующих расходных коэффициентов. При этом производительность ПС вычисляется через такты работы подсистем и общий расходный коэффициент материалов  $k_p^{\text{пс}}$  системы:

$$P_{\text{пс}} = \frac{G_{\text{ппс1}}}{\max \{ T_{\text{ппс1}}, T_{\text{ппс2}}, \dots, T_{\text{ппс}\gamma} \} k_p^{\text{пс}}}. \quad (5)$$

Предлагаемая формула соответствует тактовому подходу к оценке производительности человеко-технических систем, который рекомендуется применять при анализе и обосновании модернизации действующих производств. Следует отметить, что в теоретических и методических аспектах тактовому подходу уделяется недостаточное внимание. Отсутствует системность при определении границ и структуры такта, нет классифи-

кации и математического описания тактов, мало изучены связи между тактами элементов системы. При этом под тактом традиционно понимается интервал времени, через который периодически производится выпуск единицы продукции определенного вида на одном оборудовании (агрегате, участке).

Известно несколько терминов, соответствующих такту, например: период, темп, ритм. Следует уточнить терминологию и отметить, что такт – это временной интервал, который характеризует длительность конкретного процесса. Ритм (темп)  $R$  – это показатель обратно пропорциональный такту и соответствующий количеству продукции, произведенной за данный интервал  $B$  времени:  $R = B : T$ .

Понятие «такт» правомерно относится к процессам (технологическим, транспортным, контрольным, трудовым); к потокам (материальным, трудовым, а также информационным и финансовым); к работе оборудования (агрегатов, участков, цехов, подразделений, предприятия). По нашему мнению, в металлургическом производстве целесообразно рассматривать такты с двух позиций: по отношению к материальному потоку и по отношению к функционирующему агрегату. Значения тактов для конкретного агрегата и обрабатываемого продукта должны совпадать, а структура их моделей может быть различной [7].

Предлагается классифицировать такты по группам и признакам, характеризующим производственные процессы и производительности ПС (табл. 1). Разработанная классификация тактов включает девять групп, которые отличаются конкретными признаками. При этом каждая составляющая группы характеризуется наименованием, условным обозначением, структурой и формульным представлением.

Такты первой группы по назначению соответствуют видам производительности ПС. Такты второй группы соответствуют структуре производственного процесса, где такты системы (предприятия, цеха) органично связаны с тактами работы подсистем (участков, групп оборудования), их элементов (оборудования) и микроэлементов (механизмов, узлов). В третьей группе представлены такты по вариантам в зависимости от степени непрерывности функционирования производственного процесса с учетом согласованной работы оборудования и скорости движения материального потока. В четвертой группе рассматриваются такты процесса изготовления единицы продукции, за которую принимается либо штука, либо партия штук. В пятой группе представлены такты, структурированные из одной или множества производственных операций (элементов и микроэлементов).

Такты шестой группы выделены в соответствии с назначением каждого типа оборудования по степени значимости: основной, где осуществляется главная операция процесса, и вспомогательные, которые обеспечивают предварительные и последующие процессы

## Классификатор тактов производственной системы

Table 1. Qualifier of time steps of the production system

Наименование тактов	Модели тактов	Примечания
I. По назначению тактов		
1. Теоретический	$T^T(i) = \sum_{k=1}^K t_{ki}^o$	$t_{ki}^o$ – длительность $k$ -го элемента основной операции при производстве $i$ -й продукции
2. Технически возможный	$T^{TB}(i) = \sum_{k=1}^K t_{ki}^o + \sum_{v=1}^V t_{vi}^n$	$t_{vi}^n$ – продолжительность $v$ -й технической и (или) технологически неизбежной паузы, связанной с работой вспомогательных механизмов или с трудовыми операциями в условиях наилучшего использования оборудования
3. Нормативный	$T^H(i) = \sum_{k=1}^K t_{ki}^o + \sum_{k=1}^K t_{vi}^n + \Delta\tau_{ск}^H$	$\tau_{ск}^H$ – нормативная длительность скрытых простоев (пауз) технического, технологического, эргономического характера
4. Плановый	$T^{ПЛ}(i) = T^H(i) + \Delta\tau_{ск,о}^{ПЛ}$ $T^{ПЛ}(i) = T^{TB}(i) + \Delta\tau_{ск}^H + \Delta\tau_{ск,о}^{ПЛ}$	$\Delta\tau_{ск,о}^{ПЛ}$ – скрытые простои организационного характера, зависящие от производственных ситуаций на объекте
5. Прогнозный	$T^{пр} = f(F_M, T^T, F_{пр})$	$F_M$ – предполагаемые организационно-технические мероприятия; $F_{пр}$ – ожидаемые изменения прочих факторов
6. Фактический	$T^\Phi(i) = G_i : P_i$	$T^\Phi$ фиксируется в процессе производства с помощью хронометражных (в том числе автоматических) замеров и оперативного учета
	$T^\Phi(i) = \Phi B_i : ВП_i$	$T^\Phi$ рассчитывается по отчетным данным
II. По масштабности объекта исследования		
1. Системный	$T_c = \max \{ T_{псj} \mid j=1, J \}$	$T_{псj}$ – такт работы $j$ -й подсистемы
2. Подсистемы	$T_{псj} = \max \{ T_{псj\gamma} \mid \gamma=1, \gamma^* \}$	$T_{псj\gamma}$ – такт работы $\gamma$ -го элемента $j$ -й подсистемы
3. Элементный	$T_{псj\gamma} = \max \{ t_m \mid m=1, m^* \}$ $T_{псj\gamma} = t_1 + t_2 + \max \{ t_m \}$	$t_m$ – длительность $m$ -х микроэлементов $\gamma$ -го элемента
4. Микроэлементный	$T_{псj\gamma m} = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_\sigma$	$\tau_\sigma$ – длительность $\sigma$ -х действий, движений механизмов или персонала $m$ -го микроэлемента
III. По степени непрерывности материального потока		
1. Для непрерывного процесса	$T_{ин}(i) = T^T(i) = \frac{L}{V}$	В условиях непрерывно работающего оборудования и непрерывного материального потока (исключающих паузы); $L$ – условно единичный путь потока материалов; $V$ – скорость движения (обработки) материалов
2. Для для полунепрерывного процесса	$T_{ин}(i) = T^H(i)$	В условиях наличия скрытых простоев (пауз) в работе оборудования при непрерывном материальном потоке
	$T_{ин}(i) = T^{TB}(i) + \tau_{ск}^H(i)$	В условиях непрерывного функционирования оборудования при наличии пауз в процессе обработки материального потока
3. Для периодического (циклического) процесса	$T_{пд}(i) = T^H(i) + t_{тпр}^H(i)$ $T_{пд}(i) = T^{TB}(i) + \tau_{ск}^H(i) + t_{тпр}^H(i)$	$t_{тпр}^H$ – текущие простои, при которых двигатели оборудования отключаются и материальный поток прерывает процесс обработки
IV. По количеству одновременно обрабатываемых предметов труда (полупродуктов)		
1. Штучный (однопредметный)	$T_{шт}(i) = T_{шт1}(i)$	За единицу измерения продукции принимается штука (заготовка, плавка или деталь)
2. Партийный (многопредметный)	$T_{прт}(i) = T_{\Sigma шт}(i)$	Учитывается партия (пачка, пакет, садка, порция)
V. По количеству производственных операций		
1. Однооперационный (простой)	$T_1 = t_1$	Состоит из одной производственной операции (элемента)

Т а б л и ц а 1 (продолжение)

Наименование тактов	Модели тактов	Примечания
2. Многооперационный (сложный)	$T_z = T_{пс\dot{r}l}; T_z = T_{пс\dot{r}m};$ $T_z = T_{пс\dot{r}m\sigma}$	Состоит из множества операций (элементов) или имеющих в своем составе элементы такта, которые декомпозируются на микро-элементы
VI. По значимости используемого оборудования		
1. Основной (главный, ведущий)	$T_o^{т(тв, пл, пр, ср)}$ рассчитывается по ведущему агрегату	Определяется по главному (ведущему) агрегату в производственной системе, на котором осуществляется основная операция процесса
2. Вспомогательный	$T_{вс}^{т(тв, пл, пр, ср)}$ рассчитывается по вспомогательным агрегатам	Определяется по вспомогательным (обслуживающим) агрегатам в системе, которые обеспечивают предварительный или последующий процесс обработки основной операции
VII. По статистическим характеристикам тактов		
1. Минимальный	$T_{\min} = \min\{T_{пс1}, T_{пс2}, \dots, T_{псj}\}$	Выбирается минимальное значение такта из всего ряда тактов работы подсистем
2. Максимальный	$T_{\max} = \max\{T_{пс1}, T_{пс2}, \dots, T_{псj}\}$	Выбирается максимальное значение такта из всего ряда тактов работы подсистем
3. Средний (по виду продукции)	$T_{ср1} = \{T_1 + T_2 + \dots + T_a\} : \alpha$	Вычисляются различные виды средних значений из интервального ряда оценок: • средний арифметический с учетом общего количества оценок тактов ( $\alpha$ );
	$T_{ср2} = \alpha_1 T_1 + \alpha_2 T_2 + \dots + \alpha_x T_x$	• средневзвешенный, $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_x = 1$ ;
	$T_{ср3} = G_{ср} : P_{ср}$	• средневзвешенный (укрупненный); $G_{ср}$ – средняя масса единицы продукции
	$T_{ср4} = \text{med}\{T_1, T_2, \dots, T_a\}$	• средний медианный, характеризующий центр, около которого группируется основное количество значений тактов;
	$T_{ср5} = T_{\text{mod}}$	• средний модовый, характеризующий наиболее часто встречающиеся значения
4. Средний (по сортаменту продукции)	$T_{ср} = a_1 T_1 + a_2 T_2 + \dots + a_i T_i$	Средневзвешенный такт с учетом доли производства $i$ -го вида продукции ( $a_i$ ) на заданном отрезке времени
VIII. По степени механизации и автоматизации оборудования		
1. Аппаратурного процесса	$T_a(i) = T^t(i)$	Продолжительность физико-химических операций в специальных аппаратах, оснащенных полностью средствами механизации и автоматизации
2. Машинного процесса	$T_m(i) = T^{тв}(i)$	Продолжительность физико-механических операций с применением автоматизированных механизмов и машин
3. Машино-ручного процесса	$T_{м.р.}(i) = T_i(i) + \tau_{рб}(i)$	Продолжительность трудовых операций ( $\tau_{рб}$ ), связанных с непосредственным участием персонала (рабочего) в управлении материальными потоками или обслуживанием машин
4. Ручного процесса	$T_p(i) = \tau_{p1}(i) + \tau_{p2}(i) + \dots + \tau_{pn}(i)$	Продолжительность трудовых операций, связанных с обработкой и перемещением материалов, выполняемых рабочими
IX. По входу или выходу предметов труда при работе оборудования		
1. Входной	$T_{вх}$ соответствует формулам группы 1	Характеризует продолжительность подачи материального потока на входе в систему (подсистему, агрегат)
2. Выходной	$T_{вых}$ соответствует формулам группы 1	Характеризует продолжительность выдачи материального потока при выходе из системы (подсистемы, агрегата)

обработки. В седьмой группе представлена характеристика тактов после обработки их статистических значений различными методами, при этом среднее значение из интервального ряда оценок тактов должно быть не меньше, чем минимальное и не больше чем, максимальное. В восьмой группе рассматриваются такты, харак-

теризующие продолжительность частичных процессов и операций. В девятой группе такты выделены по месту привязки выбранных фиксажных точек (моментов начала и окончания такта) по входным и выходным параметрам материального потока системы (подсистемы, агрегата).

Ранее были разработаны тактовые модели, позволяющие оценить степень рациональности функционирования производственных процессов [6, 7], применение которых дает возможность решать задачи совершенствования ситуационного нормирования, планирования, прогнозирования и оперативного управления технологическими и трудовыми процессами. Наиболее сложной процедурой при построении нормативных моделей тактов является процесс нормирования длительности операций, циклов, тактов, их элементов и микроэлементов, а также установление нормативных коэффициентов использования каждого вида оборудования на основе комплексирования методов нормирования с учетом специфики конкретных объектов исследования, степени их механизации и автоматизации, последовательности и параллельности, непрерывности и периодичности, наблюдаемости, характера внешних и внутренних воздействий и других факторов. Не меньшее значение имеет установление рациональной напряженности норм и нормативов трудовых операций.

На стадии проектирования в процессе моделирования тактов работы оборудования в каждой подсистеме и в целом системы должны соблюдаться условия:

*a* – для непрерывного материального потока с жестко связанными (в технологическом отношении) подсистемами

$$T_{j=1}^{TB(H)} = T_{j=2}^{TB(H)} = \dots = T_{j=J}^{TB(H)} = T_{пс}^{TB(H)}, \text{ мин (ч);}$$

$$T_j^H = T_{j=J}^{TB(H)} : K_{иj};$$

*б* – для полунепрерывного материального потока

$$\left\{ T_{jвс}^{TB(H)} \right\}_{jвс=1}^J > T_{jo}^{TB(H)}, \text{ например, } T_{jo}^{TB(H)} = (1, 1 \div 1, 3) T_{jвс}^{TB(H)},$$

т.е. такты вспомогательных подсистем не должны сдерживать работу основной ведущей подсистемы.

Для действующих ПС на основе тактовых моделей формируется множество оценок тактов в зависимости от вида продукции, технологических режимов и маршрутов, количества функционирующего оборудования в каждой подсистеме и других факторов, определяется единый такт работы ПС:

$$T_{пс}^{TB(H)}(i) = \max \left\{ T_{jвс1}^{TB(H)}(i); T_{jвс2}^{TB(H)}(i); \dots; T_{jвсJ}^{TB(H)}(i); T_{jo}^{TB(H)}(i) \right\}.$$

При этом возможны следующие ситуации.

1. Наличие «узкого места» при функционировании ПС:

$$T_{пс}^{TB(H)}(i) = T_{jвс}^{TB(H)}(i); \left\{ T_{jвс}^{TB(H)}(i) \right\}_{jвс=1}^J > T_{jo}^{TB(H)}(i),$$

т.е. такт работы *j*-й вспомогательной подсистемы лимитирует (сдерживает) работу основной подсистемы. Для

ликвидации «узкого места» необходимо разработать организационно-технические мероприятия (модернизацию, реконструкцию), направленные на сокращение такта работы подсистемы, что позволит сократить такт работы всей системы.

2. Наличие «плавающего» «узкого места» в поточной системе, когда возникают следующие ситуации: технически возможный такт работы ПС соответствует одной из подсистем, а нормативный такт ПС – другой подсистеме, например

$$T_{пс}^{TB}(i) = T_{jвс1}^{TB}(i) \text{ или } T_{пс}^{TB}(i) = T_{jo}^{TB}(i), \quad T_{пс}^H(i) = T_{jвс2}^H(i).$$

В этих случаях необходимо выявить причины снижения коэффициента использования оборудования в *j*-й подсистеме, т.е. возникновения дополнительных задержек, пауз (скрытых простоев) и разработать организационные или организационно-технические мероприятия, направленные на устранение недостатков в оперативном управлении процессом, на повышение квалификационного уровня обслуживающего персонала, обеспечение надежности работы оборудования или на сокращение ручных операций.

3. Отсутствие «узкого места» в поточной системе:

$$T_{пс}^{TB(H)}(i) = T_{jo}^{TB(H)}(i), \left\{ T_{jвс}^{TB(H)}(i) \right\}_{jвс=1}^J < T_{jo}^{TB(H)}(i),$$

тогда такт работы ПС соответствует такту основной подсистемы, т.е. вспомогательные подсистемы не сдерживают ее работу.

В этом случае возможно рассматривать вариант модернизации основных агрегатов (оборудования) путем интенсификации технологического режима с целью сокращения такта работы ПС с учетом выполнения следующего ограничения:

$$\left\{ T_{jвс}^{TB(H)}(i) \right\}_{jвс=1}^J \leq T_{jo}^{TB(H)}(i).$$

Результаты реализации тактовой модели приведены на примере сортопрокатного цеха для профиля (швеллер) и представлены в табл. 2.

Сравнительный анализ технически возможных и нормативных значений тактов работы основного участка (прокатки) и вспомогательных участков (нагрева, охлаждения, порезки и пакетировки) показал, что «узким местом» в поточной системе является участок нагрева, который лимитирует работу ведущего участка прокатки. В связи с этим предложено осуществить модернизацию агрегатов на участке путем интенсификации процесса нагрева заготовок в методических печах, что даст возможность ликвидировать «узкое место» в горячем потоке металла, т.е. сократить такт работы системы, следовательно, увеличить производительность цеха и, как следствие, выпуск продукции, объем продаж, прибыль и рентабельность.

**Выбор такта работы производственной системы для профиля швеллер**

*Table 2. Selecting the time step of operation of the production system for the beam profile*

нагрева в печах		прокатки в клетки	Такты работы участков						Такт работы цеха (ПС)
одной	двух		охлаждения на секции холодильника		порезки на ножницах		пакетировки на линии		
			одной	двух	одних	двух	одной	двух	
<i>1. Технически возможные такты до модернизации, с</i>									
80	<b>40</b>	30	55	27,5	52	26	50	25	<b>40,0</b>
<i>Нормативные коэффициенты использования оборудования до модернизации</i>									
<b>0,88</b>		0,92	0,91		0,90		0,93		<b>0,88</b>
<i>2. Нормативные такты до модернизации, с</i>									
90,9	<b>45,4</b>	32,6	60,4	30,2	57,8	28,9	53,8	26,9	<b>45,4</b>
<i>3. Технически возможные такты после модернизации, с</i>									
56	28	<b>30</b>	55	27,5	52	26	50	25	<b>30,0</b>
<i>Нормативные коэффициенты использования оборудования после модернизации</i>									
0,90	0,92	<b>0,91</b>	0,90	0,93	0,92	–	–	–	<b>0,91</b>
<i>4. Нормативные такты после модернизации, с</i>									
62,2	31,1	<b>32,6</b>	60,4	30,2	57,8	28,9	53,8	26,9	<b>32,6</b>

Разработанная нормативная тактовая модель сорто-прокатного цеха позволила сформировать нормативную базу технико-экономических показателей, необходимых для планирования, прогнозирования и оперативного управления производством.

В соответствии с изменяющейся структурой тактов (по группам и признакам) и полученных их значений с учетом сортамента изменяется также и производительность ПС. Реализация тактового подхода изложена в работах [8, 9] и др. на основе построения нормативных ситуационно-тактовых моделей для оценивания производительности ПС в подразделениях металлургических предприятий (сталеплавильном, прокатном, метизном).

**Выводы.** Рассмотрен показатель «производительность» как индикатор эффективности функционирования человеко-технического комплекса. Показаны взаимосвязи производительности с другими технико-экономическими показателями ПС. Разработан тактовый подход к оцениванию производительности ПС. Предложена классификация и структурные модели тактов, позволяющие определять ситуационные такты подсистем и выбрать единый такт работы системы с целью обоснования производительности ПС (нормативной,

плановой или прогнозной) для принятия рациональных управленческих решений.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Šnapka P., Mikušová M., Janovská K., Samolejová A. Simulation model of metallurgical production management. *Metalurgija*. 52 (2013) 2, pp. 429–431.
2. Медиков В.Я. Производственные мощности и их использование. – М.: МГУП, 2002. – 264 с.
3. Организация и планирование предприятий черной металлургии: Учебник / А.Ф. Метс, К.А. Штец, Б.П. Бельгольский, Ф.И. Щепилов. – М.: Металлургия, 1986. – 560 с.
4. Сероватин А.И. Расчет производительности оборудования прокатных цехов. – М.: Металлургия, 1970. – 96 с.
5. Dušan Malindžak, Andrzej Gazda. The principles and specifics of logistics of metallurgical production // *Metal*. 2011. № 5. pp. 18 – 20.
6. Radim Lenort, Jezy Feliks. Production logistics concepts and systems in metallurgical companies // *Metal*. 2013. № 5. pp. 15 – 17.
7. Musatova A.I., Kulakov S.M., Kadykov V.N. Operating Cycles of Automated Production Systems // *Steel in translation*. 2003. Vol. 41, no. 4, pp. 294 – 300.
8. Кадьков В.Н., Кулаков С.М., Мусатова А.И. Алгоритмизация оценивания ситуационных тактов работы прокатного комплекса // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2011. № 8. С. 61 – 69.
9. Мусатова А.И., Кулаков С.М. Особенности построения нормативной модели производительности волочильных станов // *Научное обозрение*. 2014. № 3. С. 139 – 149.

Поступила 29 декабря 2014 г.

## APPLICATION OF THE TIMING MODEL IN REENGINEERING OF THE PRODUCTION SYSTEMS IN METALLURGY

**Kulakov S.M.**, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Automation and Information Systems”*

**Musatova A.I.**, *Assist. Professor of the Chair of corporate economics and personnel management*

(musatova-ai@yandex.ru)

**Kadykov V.N.**, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metal Forming and Metal Science”, OJSC “EVRAZ ZSMK”*

**Baranov P.P.**, *Dr. Sci. (Economics), Assist. Professor, Director of the Institute of Economics and Management*

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

**Abstract.** The problem of creation of the timing model for difficult production systems and their application in reengineering of ferrous metallurgical enterprises are considered. The classification of timing models was carried out by their appointment, scale of the research object, degree of continuity of a material stream, quantity of simultaneously processed semi-products, number of production operations, importance of the equipment, statistical characteristics of a time step, extent of mechanization and automation of the equipment, by an entrance and an exit of a material stream. The leading role of the indicator “productivity” and its connection with other technical and economic indicators of a production system was shown. The factorial model of system capacity is given and the fundamental factor, namely a time step of system, is allocated. The basic formula for the estimation of productivity was offered on the basis of a time step. The technique of identification of “bottlenecks” of a production system on the basis of a timing approach and an assessment of actions efficiency of reengineering is shown. The example of the application of timing models for the analysis of “bottlenecks” in rolling production is given. Possibility of timing models application is noted for planning, forecasting and operational management of production.

**Keywords:** productivity, production system, engineering-and-economic performance, correlation, classification, timing model, “bottleneck” of continuous flow system, normative base.

**DOI:** 10.15825/0368-0797-2015-5-367-375

### REFERENCES

1. Šnapka P., Mikušová M., Janovská K., Samolejová A. Simulation model of metallurgical production management. *Metallurgija*. 52 (2013) 2, pp. 429–431.
2. Medikov V.Ya. *Proizvodstvennye moshchnosti i ikh ispol'zovanie* [Production capacity and its usage]. Moscow: MGUP, 2002. 264 p. (In Russ.).
3. Mets A.F., Shtets K.A., Bel'gol'skii B.P., Shchepilov F.I. *Organizatsiya i planirovanie predpriyatii chernoi metallurgii: Uchebnik* [Arrangement and planning of ferrous metallurgy enterprises: Textbook]. Moscow: Metallurgiya, 1986. 560 p. (In Russ.).
4. Serovatin A.I. *Raschet proizvoditel'nosti oborudovaniya prokatnykh tsekhov* [Equipment performance calculations of rolling-mill shops]. Moscow: Metallurgiya, 1970. 96 p. (In Russ.).
5. Dušan Malindžak, Andrzej Gazda. The principles and specifics of logistics of metallurgical production. *Metal*. 2011, no. 5, pp. 18–20.
6. Radim Lenort, Jezy Feliks. Production logistics concepts and systems in metallurgical companies. *Metal*. 2013, no. 5, pp. 15–17.
7. Musatova A.I., Kulakov S.M., Kadykov V.N. Operating Cycles of Automated Production Systems. *Steel in translation*. 2003. Vol. 41, no. 4, pp. 294–300.
8. Kadykov V.N., Kulakov S.M., Musatova A.I. Algorithmization of estimation of situational time steps of a rolling complex. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2011, no. 8, pp. 61–69. (In Russ.).
9. Musatova A.I., Kulakov S.M. Construction peculiarities of a normative performance model of draw benches. *Nauchnoe obozrenie*. 2014, no. 3. pp. 139–149. (In Russ.).

Received December 29, 2014

УДК 681.51

## СОСТОЯНИЕ И ПУТИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СО СТРУКТУРНЫМ РАЗНООБРАЗИЕМ\*

*Мышляев Л.П.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор кафедры автоматизации  
и информационных систем (nicsu@ngs.ru)*

*Ивушкин А.А.<sup>2</sup>, д.т.н., генеральный директор*

*Ивушкин К.А.<sup>2</sup>, к.э.н., заместитель генерального директора*

*Грачев В.В.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры автоматизации и информационных систем*

*Ляховец М.В.<sup>1</sup>, к.т.н., директор Института информационных технологий  
и автоматизированных систем*

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

<sup>2</sup> ООО «Объединенная компания «Сибшахтстрой»  
(654034, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, шоссе Кузнецкое, 9)

**Аннотация.** Статья посвящена анализу текущего состояния и перспективам развития систем управления со структурным разнообразием. Построение таких систем основано на совместном синтезе объекта управления и управляющей подсистемы. При этом объект управления представляет собой объект с целенаправленно изменяющейся структурой. Показана необходимость разработки новых подходов, методов и алгоритмов управления объектами со структурным разнообразием. Представлена обобщенная схема системы управления с целенаправленно изменяемой структурой и определены три типа реализации этой схемы. Сформулированы две задачи, возникающие при создании малоразмерных аналогов объектов управления, которые в дальнейшем могут быть использованы как физические модели в системах управления. Во-первых, обеспечение подобия системы управления физической моделью и натурной (промышленной) системы управления. Во-вторых, развитие структуры управления с физической моделью, предложенной академиком А.А. Красовским. Рассмотрена схема управления подобием систем управления и предложен вариант системы управления с физической моделью. Приведена общая структура идентификатора в виде замкнутой динамической системы.

**Ключевые слова:** система управления, структурное разнообразие, подобие, моделирование, натурно-математическое имитационное моделирование, модель объекта, алгоритм управления, физическая модель, целенаправленно изменяемая структура, идентификатор.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-376-380

Традиционные подходы и методы анализа и синтеза систем управления классической и современной теории управления базируются, как правило, на предпосылках об известных или уточняемых свойствах объекта управления, особенно об их структуре. При этом не предполагается каких-либо целенаправленных воздействий на структуру объекта в процессе управления и, тем более, не вовлекается в процесс синтеза механизм образования и изменения структуры объекта управления. Также не охватывают известные методы и многие структуры объектов управления, широко распространенных на практике, например, объекты, число управляющих воздействий которых больше числа выходных целевых переменных, объекты с рециклом, в которых из выходной переменной исключается величина рецикла. Такое положение дел вызывает необходимость разработки новых подходов, методов и алгоритмов управления объектами со структурным разнообразием.

Синтезу систем управления объектами сложной динамики в условиях неопределенности, в том числе с изменяющейся структурой, посвящено достаточно много исследований отечественных и зарубежных ученых [1 – 3]. Как правило, в этих работах рассматриваются определенные аспекты проблемы, например, в работах школы С.В. Емельянова – системы управления с переменной структурой, где последняя сосредоточена в управляющей части системы; системы с новыми типами обратной связи, позволяющей формировать различные структуры законов управления для достижения требуемой динамики систем управления в целом [1]. В работах Л. Льюнга [4] приводятся методы и алгоритмы идентификации очень узкого класса объектов достаточно простой структуры, причем объекты рассматриваются вне системы управления. В исследованиях по моделированию рассматривается подобие только преобразующих механизмов объектов управления [5] и даже не ставится задача подобия систем управления в целом. Также не ставится нигде задача динамическо-

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

го управления структурой самого объекта управления. Только в работах по материаловедению лишь упоминается об управлении структурообразованием [6].

Практика же создания систем автоматизации управления требует решения взаимосвязанного комплекса задач, к числу которых в первую очередь можно отнести:

- разработку методов синтеза и базовых алгоритмов управления объектами с переменной (изменяющейся) структурой в условиях неопределенности;
- разработку методов синтеза совместно объектов управления и управляющих подсистем;
- развитие теории и разработку базовых алгоритмов управления объектами с различными типами положительной обратной связи (с рециклом);
- создание научных основ теории подобию систем управления;
- развитие методов управления с прогнозирующей физической моделью;
- разработку методов синтеза алгоритмов идентификации для объектов со сложной структурой, функционирующих в системе управления;
- испытание разработанных решений на промышленных объектах, в материаловедении, в социальных системах.

Достижение желаемых динамических свойств системы только за счет управляющих подсистем зачастую невозможно. В этих случаях решение лежит на пути изменения динамических свойств самого объекта за счет оперативного изменения его структуры (в частном случае параметров) в процессе его функционирования, т.е. за счет целенаправленного управляемого воздействия на структуру объекта.

Обобщенная схема системы управления с целенаправленно изменяемой структурой имеет вид, представленный на рис. 1.

Можно выделить три типа реализации этой схемы:

- с введением дополнительных структур объекта для расширения области допустимых состояний и выбором последовательности структур для обеспечения заданных требований к эффективности управления;
- с текущим оцениванием и анализом показателей эффективности управления, выбором необходимой структуры объекта управления и обеспечением безударных режимов управления;
- с выделением типопредставительных ситуаций функционирования системы управления по каждой структуре системы, имитационным пересчетным моделированием, оцениванием показателей эффективности управления, выбором необходимой структуры объекта управления и обеспечением безударных режимов управления.

Для оперативного управления структурой объекта необходимо обеспечение такой возможности на стадии проектирования. Традиционно сначала создается объ-

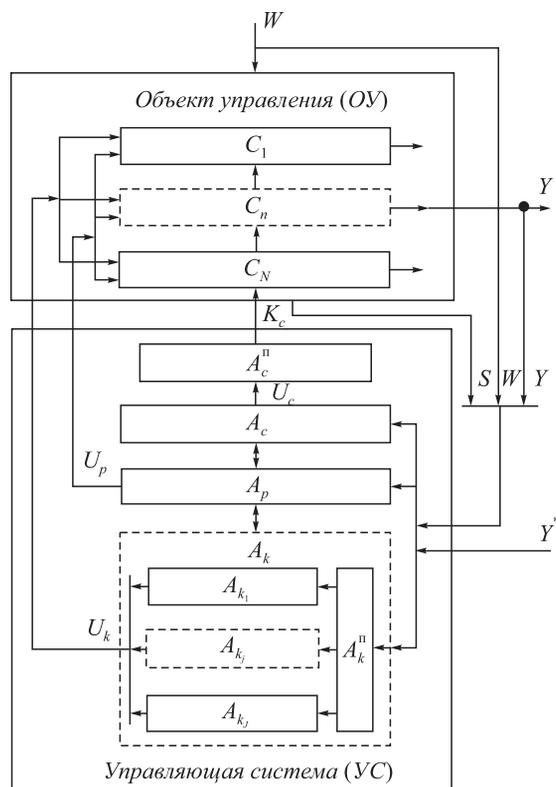


Рис. 1. Обобщенная схема системы управления объектом с целенаправленно изменяемой структурой:

$C_n$  –  $n$ -я структура ОУ,  $n = 1, N$ ;  $A_c, A_p, A_k$  – алгоритмы структурного, параметрического и координатного управления;  $A_{k_j}$  –  $j$ -я структура алгоритма координатного управления  $A_k, j = 1, J$ ;  $A_c^n$  и  $A_k^n$  – алгоритмы переключения структуры ОУ и алгоритма  $A_k$ ;  $K_c, K_k$  – управляющие команды на переключение структур;  $W$  и  $Y, S$  – векторы внешних и выходных воздействий, состояний объекта;  $Y^*$  – задание на  $Y$ , цели, ограничения;  $U_c, U_p$  и  $U_k$  – структурные, параметрические и координатные управляющие воздействия

Fig. 1. The generalized scheme of control system with purposefully variable structure:

$C_n$  –  $n$  structure of control object,  $n = 1, N$ ;  $A_c, A_p, A_k$  – algorithms of structural, parametric and coordinate control;  $A_{k_j}$  –  $j$  structure of coordinate control algorithms  $A_k, j = 1, J$ ;  $A_c^n$  and  $A_k^n$  – algorithms of switching of control object structure and algorithm  $A_k$ ;  $K_c, K_k$  – control commands on switching structures;  $W$  and  $Y, S$  – vectors of external and output actions, of object states;  $Y^*$  – task for  $Y$ , purposes, limitation;  $U_c, U_p, U_k$  – structural, parametric and coordinate control actions

ект управления (технология, агрегат и т.д.) и уже на основе модели этого объекта синтезируется управляющая подсистема. Необходим переход от этой традиционной системы к совместному созданию объекта и управляющей системы. Одним из вариантов такого создания может быть итерационная схема, включающая первоначальный синтез объекта управления, разработку управляющей системы, корректировку объекта управления, затем управляющей системы и т.д. Такая схема полезна также и для синтеза обычных систем управления в силу того, что включение объекта в систему управления ведет к изменению его свойств [7].

Этапом разработки новых объектов управления является создание их малоразмерных аналогов, которые в

дальнейшем могут быть использованы как физические модели в системах управления. И здесь возникают две задачи.

Первая – обеспечение подобия системы управления физической моделью и натурной (промышленной) системы управления. Существующая теория подобия ориентирована на подобие только объектов (геометрических параметров, физических свойств) и не затрагивает подобия внешних воздействий, показателей динамики объекта, необходимых для синтеза управляющей подсистемы, и, тем более, подобия в целом систем управления. В первую очередь здесь требуется определение понятий подобия систем управления, их отдельных элементов, формирование критериев и условий подобия. Например, системы управления можно считать подобными, если эффективность их функционирования одинакова с точностью до малой величины и соотношение показателей динамических свойств объектов и частотных свойств, характеризующих автокорреляционной функцией приведенных возмущений, также отличается не больше, чем на заданную величину.

Вторая задача – развитие структуры управления с физической моделью, предложенной академиком А.А. Красовским [8], в направлении согласования по физической сущности, времени и величине всех видов воздействия на натурную и модельную системы управления и, обязательно, управление подобием этих систем. Общая схема такой системы будет иметь

вид, представленный на рис. 2, где приняты следующие обозначения:  $U$ ,  $W$  и  $Y$  – векторы управляющих, внешних и выходных воздействий;  $Z = \{U; W_k; Y; Y^*\}$ ;  $U^P = \{U_w^{pO}; U_w^{p\Phi}; U_s^{pO}; U_s^{p\Phi}\}$ ;  $U^P$  – общий вектор управляющих воздействий подобием систем управления;  $U_s^{pO}$  и  $U_s^{p\Phi}$  – векторы управляющих воздействий, направленные на натурный объект управления, его координатную управляющую систему и на физическую модель и ее координатную управляющую систему;  $U_w^{pO}$  и  $U_w^{p\Phi}$  – векторы управляющих воздействий, направленные на целенаправленное изменение свойств внешних воздействий натурального объекта и его физической модели соответственно; надстрочные индексы «D», «O» и «Ф» означают принадлежность соответственно к действительным значениям воздействий, натурному объекту управления и его физической модели; подстрочные индексы «k», «w» и «s» означают принадлежность к контролируемым, внешним воздействиям и элементам системы управления.

Особо следует выделить структуру системы управления, когда подсистема управления с физической моделью является элементом натурной управляющей системы (рис. 3). Такая компоновка системы управления в целом выдвигает специфические требования динамического подобия системы управления физической моделью [9].

При решении большинства задач управления необходимо получать и постоянно уточнять модель объекта, т.е. проводить идентификацию объекта. До настоящего

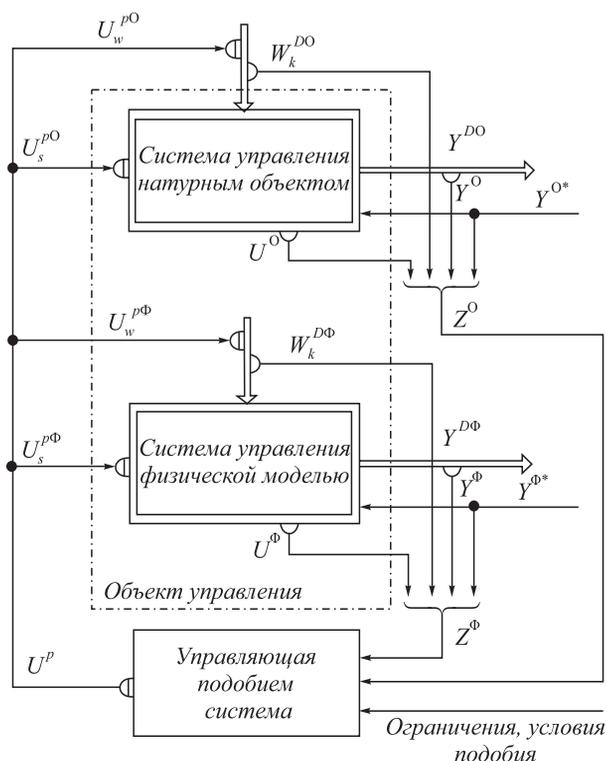


Рис. 2. Схема управления подобием систем управления

Fig. 2. The control circuit of control system similarity

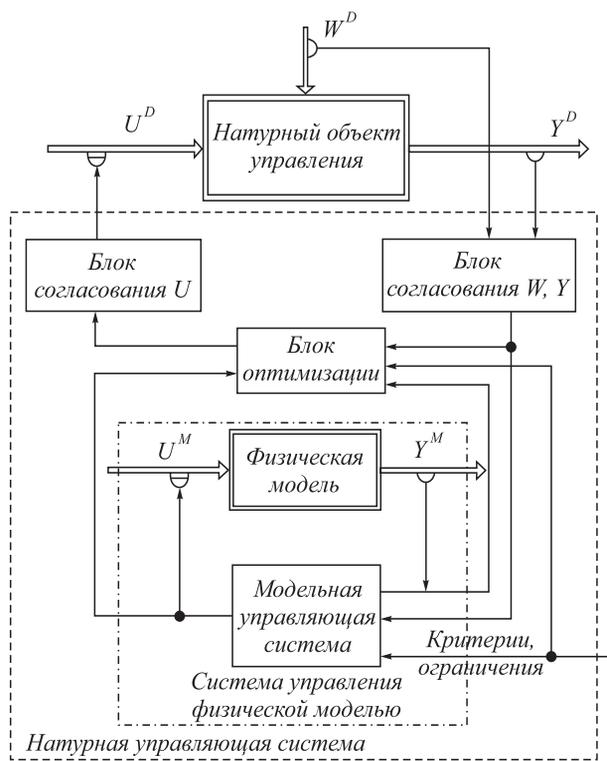


Рис. 3. Вариант системы управления с физической моделью

Fig. 3. The variant of control system with the physical model

времени нет универсальных методов синтеза алгоритмов идентификации для объектов сложной структуры, особенно функционирующих в системах управления. Перспективное направление создания таких методов состоит в представлении идентификатора в виде замкнутой динамической системы, где объектом управления является структура модели, а алгоритм управления синтезируется известными методами теории управления с использованием новых типов обратной связи. Схема такого идентификатора приведена на рис. 4 [10], на котором  $W$ ,  $U$  и  $Y$  – измеренные внешние, координатные управляющие и выходные воздействия;  $U_p$  – параметрическое управляющее воздействие на модель объекта; индексы «D» – действительные, «M» – модельные воздействия;  $\ominus$  – измерительный блок.

**Выводы.** Развитие методов синтеза и анализа систем управления со структурным разнообразием позволит создавать высокоэффективные системы управления сложными объектами разнообразной природы.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Емельянов С.В., Коровин С.К. Новые типы обратной связи: Управление при неопределенности. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 352 с.
2. Системы автоматизации на основе натурно-модельного подхода: Монография в 3-х томах. Том 2: Системы автоматизации производственного назначения / Л.П. Мышляев, А.А. Ивушкин, Г.П. Сазыкин и др.; Под ред. Л.П. Мышляева. – Новосибирск: Наука, 2006. – 483 с.
3. Рей У. Методы управления технологическими процессами. – М.: Мир, 1983. – 368 с.
4. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Пер. с англ.; Под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука, 1991. – 432 с.

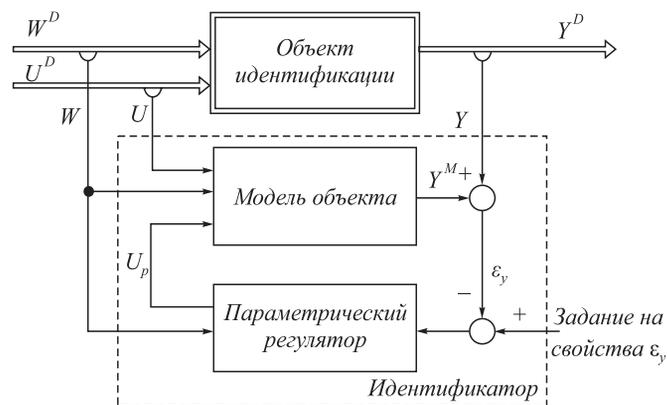


Рис. 4. Общая структура идентификатора

Fig. 4. The general structure of identifier

5. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. – М.: Высшая школа, 1976. – 479 с.
6. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин и др. – М.: Наука, 1994. – 383 с.
7. Ляховец М.В., Мышляев Л.П., Львова Е.И. и др. Совместный синтез объекта управления и управляющей подсистемы // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 12. С. 33 – 36.
8. Красовский А.А. Оптимальное управление посредством физической прогнозирующей модели // Автоматика и телемеханика. 1979. № 2. С. 156 – 162.
9. Мышляев Л.П., Евтушенко В.Ф., Березин Д.Г. и др. Понятия и условия подобия систем управления // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 12. С. 56 – 58.
10. Методы идентификации промышленных объектов в системах управления / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, Л.П. Мышляев и др. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2007. – 307 с.

Поступила 6 февраля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 5, pp. 376–380.

## SITUATION AND DEVELOPMENT TRENDS OF CONTROL SYSTEMS WITH STRUCTURAL DIVERSITY

*Myshlyaev L.P.<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Automation and Information Systems" (nicsu@ngs.ru)*

*Ivushkin A.A.<sup>2</sup>, Dr. Sci. (Eng.), General Director*

*Ivushkin K.A.<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Economics), Deputy General Director*

*Grachev V.V.<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Automation and Information Systems"*

*Lyakhovets M.V.<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Institute of Automation and Information Systems*

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

<sup>2</sup> LLC United Company "Sibshahtostroi" (9, Kuznetskoe route, Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654034, Russia)

**Abstract.** This article analyzes the current state and prospects of development of control systems with structural diversity. The construction of such systems is based on the synthesis of the joint control object and control subsystem. In this case, the control object is an object with a purposefully changing structure. The need to develop new approaches, methods and algorithms for control objects with structural diversity

has been showed. The generalized scheme of control system with purposefully variable structure was presented and three types of implementation of the scheme have been identified. Two problems that arise in the development of small analog control objects, which can then be used as physical models of control systems, have been formulated. They are, firstly, ensuring similarity of control system of physical model and full-scale (industrial) control system, and, secondly, the development of the governance structure of the physical model proposed by the academician Krasovskii A.A. The control circuit of control systems similarity has been considered and a variant of control system with the physical model has been offered. The general structure of an identifier in the form of a closed dynamical system has been given.

**Keywords:** control system, structural diversity, similarity, modeling, natural-mathematical simulation, object model, control algorithm, physical model, specifically changes structure, identifier.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-376-380

#### REFERENCES

1. Emel'yanov S.V., Korovin S.K. *Novye tipy obratnoi svyazi: Upravlenie pri neopredelennosti* [New types of feedbacks: Control at indeterminacy]. Moscow: Nauka. Fizmatlit, 1997. 352 p. (In Russ.).

2. Myshlyaev L.P., Ivushkin A.A., Sazykin G.P. etc. *Sistemy avtomatizatsii na osnove naturno-model'nogo podkhoda: Monografiya v 3-kh tomakh. Tom 2: Sistemy avtomatizatsii proizvodstvennogo naznacheniya* [Automation systems on the basis of a full-scale model approach: Monograph in 3 volumes. Vol. 2: Commercial automation system]. Myshlyaev L.P. ed. Novosibirsk: Nauka, 2006. 483 p. (In Russ.).
3. Ray W. Harmon. Advanced process control. McGraw-Hill, New York etc. 1981, 326 p. (Russ.ed.: Ray W. *Metody upravleniya tekhnologicheskimi protsessami*. Moscow: Mir, 1983. 368 p.)
4. Ljung Lennart. System identification: Theory for the user. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1987. (Russ.ed.: Ljung L. *Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya*. Tsypkin Ya.Z. ed. Moscow: Nauka, 1991. 432 p.)
5. Venikov V.A. *Teoriya podobiya i modelirovaniya* [Similarity theory and modeling]. Moscow: Vysshaya shkola, 1976. 479 p. (In Russ.).
6. Ivanova V.S., Balankin A.S., Bunin I.Zh. etc. *Sinergetika i fraktaly v materialovedenii* [Synergetics and fractals in material science]. Moscow: Nauka, 1994. 383 p. (In Russ.).
7. Lyakhovets M.V., Myshlyaev L.P., L'vova E.I., Ivushkin K.A., Chernyavskii S.V. Joint synthesis of the control object and the controlling subsystem. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 12, pp. 33–36. (In Russ.).
8. Krasovskii A.A. Optimum control by means of a physical predictive model. *Avtomatika i telemekhanika*. 1979, no. 2, pp. 156–162. (In Russ.).
9. Myshlyaev L.P., Evtushenko V.F., Berezin D.G., Makarov G.V., Ivushkin K.A. Concepts and conditions for control system similarity. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 12, pp. 56–58. (In Russ.).
10. Emel'yanov S.V., Korovin S.K., Myshlyaev L.P. etc. *Metody identifikatsii promyshlennykh ob"ektov v sistemakh upravleniya* [Identification methods of industrial objects in the control systems]. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2007. 307 p. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was supported by the grant of RFBR according to the project no. 15-07-02231.

Received February 6, 2015

УДК 681.51

## УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТАМИ С РЕЦИКЛОМ\*

*Мышляев Л.П.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор кафедры автоматизации  
и информационных систем (nicsu@ngs.ru)**Циряпкина А.В.<sup>1</sup>, аспирант кафедры автоматизации и информационных систем**Ивушкин К.А.<sup>2</sup>, к.э.н., заместитель генерального директора**Киселев С.Ф.<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры автоматизации и информационных систем*<sup>1</sup> Сибирский государственный индустриальный университет  
(654007, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42)<sup>2</sup> ООО «Объединенная компания «Сибшахтострой»  
(654034, Россия, Кемеровская обл., г. Новокузнецк, шоссе Кузнецкое, 9)

**Аннотация.** В статье рассматривается вопрос управления объектами с положительной обратной связью или с рециклом. Введение положительных обратных связей в объекты управления различной природы придает им качественно новые свойства и существенно изменяет динамику поведения, что требует особого подхода в вопросах регулирования. Приведена классификация объектов с рециклом с выделением четырех типов: рецикл «по концентрации», «по массе», «по массе и по концентрации», а также объекты с «координатными и параметрическими воздействиями рецикла». Описана структура модели объекта с рециклом для первых трех классов в общем виде. Приведена система регулирования для объектов с рециклом «по массе» и система координатно-параметрического управления для объекта с рециклом. Представлены результаты аналитического и численного исследований, результаты анализа эффективности систем регулирования, а также графики переходных процессов «по возмущению» и «по заданию».

**Ключевые слова:** объект управления, положительная обратная связь, объект с рециклом, система автоматического регулирования, координатное управление, параметрическое управление.

DOI: 10.15825/0368-0797-2015-5-381-385

Введение положительных обратных связей в объекты управления (объекты с рециклом) различной природы придает им качественно новые свойства и существенно изменяет динамику поведения. Примерами таких объектов могут служить процессы окомкования материалов для получения окатышей и агломерата в металлургической промышленности: замкнутые водношламовые системы обогащения полезных ископаемых, социально-экономические системы при постоянном выделении организации материальных и финансовых средств в зависимости от результатов деятельности; процессы образования фрактальных структур материалов [1 – 6].

Математические модели объектов с рециклом в пространстве состояний в достаточно общем виде описываются выражениями

$$X(t) = A(t)X(t - \tau_x) + B(t)U(t - \tau_u) + C(t)W(t - \tau_w);$$

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

где  $X$ ,  $U$ ,  $W$ ,  $Y$  и  $E$  – векторы состояний, управления, внешних воздействий, выходов и погрешностей измерений;  $\tau_x$ ,  $\tau_u$ ,  $\tau_w$ ,  $\tau_y$ ,  $\tau_e$  – соответствующие времена запаздывания;  $A(t)$ ,  $B(t)$ ,  $C(t)$ ,  $D(t)$ ,  $F(t)$  – матрицы соответствующих размерностей;  $t$  – непрерывное время.

Объекты с рециклом можно разделить на следующие классы.

1. Объекты с рециклом «по концентрации» (по терминологии [5]), когда соотношение расходов материалов (энергии, финансовых средств) прямой цепи и цепи рецикла фиксировано, а показатели (температура и пр.) материала изменяются. В этом случае матрица  $A(t)$  не зависит от состояния  $X(t)$  и  $D(t) = 1$ .

2. Объекты с рециклом «по массе», когда за выходное воздействие принимается часть материала (готовой продукции), поступающей на выход объекта, а другая часть материала поступает в цепь рецикла. Соотношение этих частей может изменяться в зависимости от внешних условий, состояний, агрегатов и т.д. и, как правило, специально не контролируется. В этом случае матрица  $A(t)$  зависит от состояния  $X(t)$  и  $D(t) \neq 1$ .

3. Объекты с рециклом «по концентрации» и «по массе», объединяющие первые два класса.

4. Объекты, в которых рецикл влияет на характеристики отдельных их составляющих. В этом случае матрицы  $B(t)$  и  $C(t)$  зависят от состояния  $X(t)$ .

При рассмотрении возмущенного (в отклонении от опорного) движения [7] структура модели объекта с рециклом для классов объектов 1 – 3 имеет вид, представленный на рис. 1.

\* Работа поддержана грантом РФФИ по проекту № 15-07-01972.

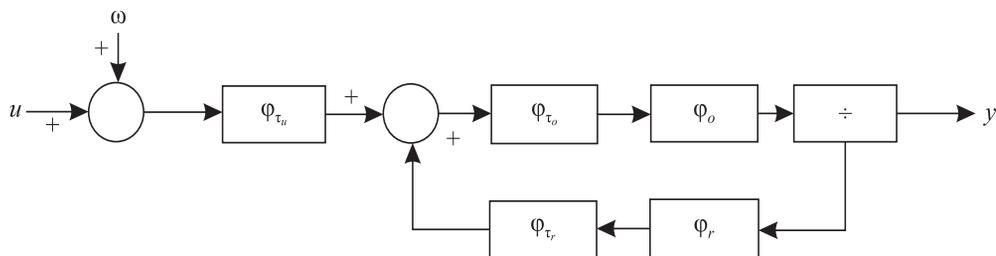


Рис. 1. Структура модели объекта с рециклом:

$u, w$  и  $y$  – управляющее, приведенное к управляющему входу неконтролируемое возмущение и выходное воздействие;  $\Phi_o$  и  $\Phi_r$  – операторы прямой цепи и рецикла без учета запаздывания;  $\Phi_{\tau_u}, \Phi_{\tau_o}$  и  $\Phi_{\tau_r}$  – операторы запаздывания в управлении, прямой цепи (состоянии) и рецикле;  $\div$  – блок деления

Fig. 1. The structure of model of object with recycle:

$u, w, y$  – controlling action, controlling input disturbance and output action;  $\Phi_o, \Phi_r$  – direct circuit operators with and without time lag;  $\Phi_{\tau_u}, \Phi_{\tau_o}, \Phi_{\tau_r}$  – control time lag operator, direct circuit time lag operator and recycling time lag operator;  $\div$  – dividing block

Для объектов первого класса синтезирована система регулирования с компенсацией эффектов действия рецикла  $\Phi_r, \Phi_{\tau_r}$  и элементов запаздывания  $\Phi_{\tau_u}, \Phi_{\tau_o}$ . Операторная зависимость выходного воздействия  $y$  от входных воздействий  $u$  и  $w$  для этих систем имеет вид

$$y(S) = \frac{A(S)B(S)w(S) + \Phi_{\tau_o}^M(S) \left[ 1 - \Phi_{\tau_o}(S)\Phi_o(S)\Phi_{\tau_r}(S)\Phi_r^M(S) \right] B(S) + A(S)f_{\tau_u+\tau_o}(S)f(S)y^*(S)}{\Phi_{\tau_o}^M(S) \left[ 1 - \Phi_{\tau_o}(S)\Phi_o(S)\Phi_{\tau_r}(S)\Phi_r^M(S) \right] B(S) + \Phi_{\tau_u+\tau_o}(S)\Phi_o(S)\Phi_{\tau_r}^M(S)B(S)};$$

$$A(S) = \Phi_{\tau_u+\tau_o}(S)\Phi_{\tau_u}^M(S)\Phi_o(S);$$

$$B(S) = 1 + f(S)\Phi_{\tau_o}(S) \left[ 1 - f_{\tau_u+\tau_o}(S)\Phi_{\tau_u+\tau_o}(S) \right], \quad (1)$$

где  $f(S)$  – оператор регулирующего блока;  $f_{\tau_u+\tau_o}(S)$  – оператор экстраполяции.

При адекватности модели объекту характеристическое уравнение выражения (1)

$$1 + \Phi_o(S)f(S) = 0 \quad (2)$$

не содержит операторов запаздывания и рецикла, и синтез оператора  $f(S)$  осуществляется как для объекта  $\Phi_o(S)$ . Полученная система содержит как частные случаи системы регулирования Смита, Ресвика [8], а также системы с типовыми законами регулирования.

Для второго класса объектов с рециклом методом эквивалентных преобразований [9, 10] синтезирована система управления, представленная на рис. 2, где знаком « $\times$ » обозначен оператор умножения, а « $\Sigma$ » – суммирование.

В этой системе оперативно оценивается величина  $\alpha$  – соотношение между выходным воздействием объекта  $y$  и воздействием  $y_r$ , поступающим на вход рецикла. Эта величина в последующем учитывается при выработке управляющего воздействия.

Аналитические и численные исследования системы управления рис. 2 в сопоставлении с системой с типо-

выми законами регулирования проведены для объекта, в котором оператор  $\Phi_o(S)$  задается звеном с самовыравниванием и без самовыравнивания. В результате получены следующие выводы.

1. Для объектов с самовыравниванием

- система управления рис. 2 остается устойчивой при любых соотношениях  $\tau_r/\tau_o$ , система с типовым законом регулирования становится устойчивой только при достижении  $\tau_r/\tau_o$  величины 38;
- для устойчивых систем во всем исследуемом диапазоне соотношений  $\tau_r/\tau_o$  система рис. 2 превосходит по точности систему с типовым законом регулирования.

2. Для объектов без самовыравнивания

- система управления рис. 2 остается устойчивой при любых соотношениях  $\tau_r/\tau_o$ , система с типовым законом регулирования не устойчива при любых соотношениях  $\tau_r/\tau_o$ .

3. Системы регулирования объекта с рециклом «по массе» устойчивы только при  $\alpha > 0,5$ .

Примером модели четвертого класса объектов могут служить зависимости, отражающие динамику преобразований внешних и управляющих воздействий:

$$y(t) = y_k(t) + y_p(t) + \omega(t);$$

$$T_k(u_p, t) \frac{dy_k(t)}{dt} + y_k(t) = k_k(u_p, t)u_k(t - \tau_k);$$

$$T_p \frac{dy_p(t)}{dt} + y_p(t) = k_p u_p(t - \tau_p);$$

$$T_k(u_p, t) = T_k^* + \alpha u_p(t);$$

$$k_k(u_p, t) = k_k^* + \alpha u_p(t),$$

где  $y(t)$  – выходное воздействие;  $y_k(t)$  – выходное воздействие объекта под влиянием координатного управляющего воздействия;  $y_p(t)$  – выходное воздействие объекта под влиянием параметрического управляющего воздействия;  $\omega(t)$  – приведенное к выходу объекта управления неконтролируемое возмущающее воздей-

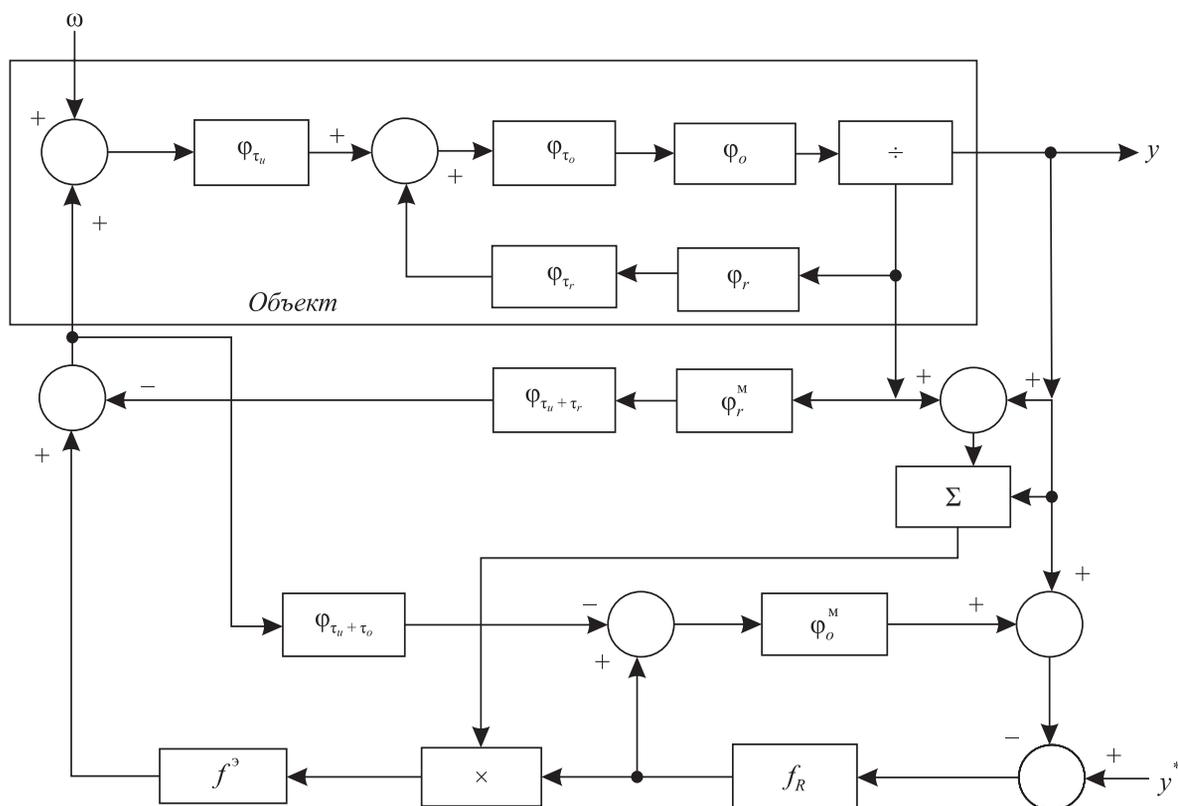


Рис. 2. Система регулирования объектов с рециклом «по массе»

Fig. 2. Weight control system of objects with recycle

стве;  $u_k(t)$  – координатное управляющее воздействие;  $u_p(t)$  – параметрическое управляющее воздействие;  $\alpha$  – величина доли готового продукта, возвращаемого в объект управления по цепи рецикла;  $T_k^*$ ,  $k_k^*$  и  $T_k$ ,  $k_k$  – базовые и расчетные значения постоянной времени и коэффициента усиления;  $\tau_k$  и  $\tau_p$  – запаздывание в канале координатного и параметрического управления.

Рациональная структура системы управления такого рода объектами содержит контуры координатного и параметрического управления, а также блоки адаптации параметров законов управления этих контуров. Один из вариантов подобной системы управления представлен на рис. 3.

Численные исследования данной системы проведены для следующих условий:

- при работе системы задействован только контур координатного управления, контур параметрического управления и блок адаптации выключены;
- при работе системы задействованы контуры координатного и параметрического управления, блок адаптации выключен;
- при работе системы задействованы контуры координатного и параметрического управления; в блоке адаптации выполняется корректировка текущих значений коэффициентов моделей канала преобразований координатных управляющих воздействий.

Пример переходного процесса «по возмущению» ( $w = 1$ ) и «по заданию» ( $w = 0$ ) представлен на рис. 4.

Введение в систему контура параметрического управления в дополнение к контуру координатного управления с корректировкой коэффициентов используемых моделей приводит к улучшению качества регулирования не менее чем на 25 %.

**Выводы.** Дана классификация объектов с рециклом с выделением рециклов «по концентрации», «по массе», с «координатными и параметрическими воздействиями рецикла». Для каждого класса объектов разработаны системы управления, эффективность которых подтверждена аналитическими и численными исследованиями.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пайтген Х.О., Рихтер П.Х. Красота фракталов. Образы комплексных динамических систем / Пер. с англ. – М.: Мир, 1993. – 176 с.
2. Старовацкая С.Н., Циряпкина И.В., Мышляев Л.П. Методы идентификации структур материалов фракталами // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2014. № 3. Т. 11. С. 290 – 293.
3. Starovackaya S.N., Myshlyayev L.P., Tsiryapkina I.V. Materials structure description by fractal complex // External fields processing and treatment technology and preparation of nanostructure of metals and alloys: Book of the International seminar articles, 1 – 7 October 2014, Siberian State Industrial University / Gromov V. ed. – Novokuznetsk: Publishing Center SibSIU, 2014. P. 348.

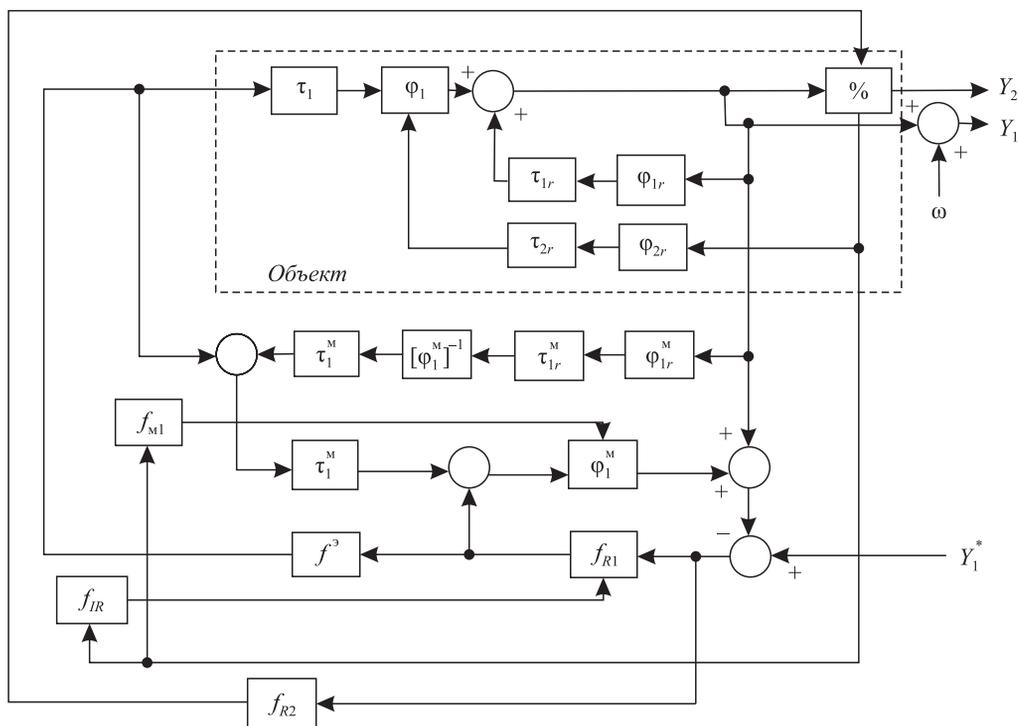


Рис. 3. Система координатно-параметрического управления объекта с рециклом:

$Y_1$  – выходное воздействие объекта под влиянием координатного управляющего воздействия;  $Y_2$  – выходное воздействие объекта под влиянием параметрического управляющего воздействия;  $f_{R1}, f_{R2}, f_{M1}, f_{IR}$  – операторы регуляторов координатного и параметрического контура, блоков адаптации оператора  $f_{R1}$  и модели  $\Phi_1^M$

Fig. 3. Coordinate-parametric control system of object with recycle:

$Y_1$  – output action of the object under the influence of coordinate controlling action;  $Y_2$  – output action of the object under the influence of parametric controlling action;  $f_{R1}, f_{R2}, f_{M1}, f_{IR}$  – operators of: coordinate and parametric circuit controllers, adaptation block  $f_{R1}$  operator and  $\Phi_1^M$  model operator

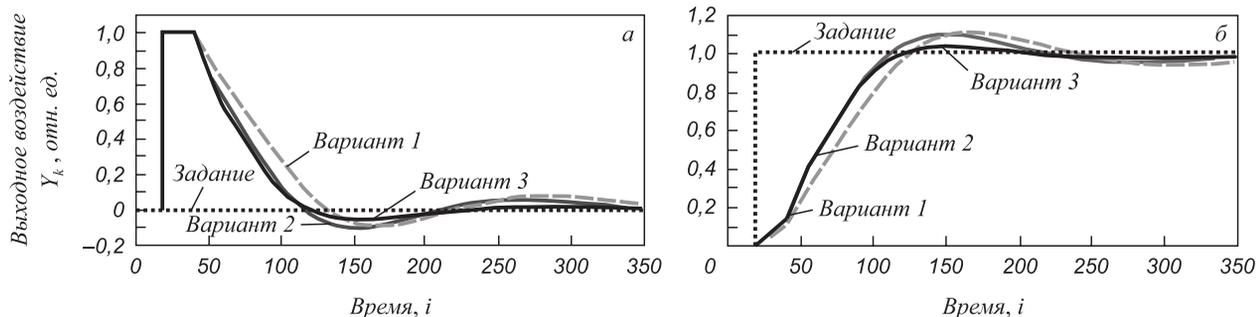


Рис. 4. Переходные процессы «по возмущению» (а) и «по заданию» (б)

Fig. 4. The transient processes of “for disturbance” (a) and “on the job” (б)

4. Kiseleva M.Y., Smagin V.I. Model predictive control for discrete systems with state and input delays / Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2011. № 1. С. 5 – 12.
5. Sim T.P., Hong G.S., Lim K.B. Modified Smith predictor with dementhon-horaud pose estimation algorithm for 3D visual servoing. – Robotica: Cambridge University Press, 2002, no. 2, pp. 615 – 624.
6. Li Yi, Ko King-Tim, Chen Guanrong A Smith predictor based PI-controller for active queue management / IEICE Transactions on communications // Oxford University Press, 2005, no. 11, pp. 42 – 93.
7. Рей У. Методы управления технологическими процессами. – М.: Мир, 1983. – 368 с.
8. Летов А.М. Динамика полета и управление. – М.: Наука, 1969. – 360 с.
9. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М.: Машиностроение, 1974. – 328 с.
10. Системы автоматизации на основе натурно-модельного подхода: Монография в 3-х т. Т. 2. Системы автоматизации производственного назначения / Л.П. Мышляев, А.А. Ивушкин, Г.П. Сазыкин и др.; Под ред. Л.П. Мышляева. – Новосибирск: Наука, 2006. – 483 с.

Поступила 5 февраля 2015 г.

## MANAGEMENT OF OBJECTS WITH RECYCLE

**Myshlyaev L.P.<sup>1</sup>**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Automation and Information Systems” (nicsu@ngs.ru)

**Tsiryapkina A.V.<sup>1</sup>**, Postgraduate, Junior Researcher of the Chair “Automation and Information Systems”

**Ivushkin K.A.<sup>2</sup>**, Cand. Sci. (Economics), Deputy General Director

**Kiselev S.F.<sup>1</sup>**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Automation and Information Systems”

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

<sup>2</sup> **LLC United Company “Sibshahtostroy”** (9, Kuznetskoe route, Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654034, Russia)

**Abstract.** The article discusses the management of objects with positive feedback or recycles. Introduction of positive feedbacks in the management objects of different nature gives them qualitatively new properties and change significantly the dynamics of behavior that requires a special approach in the regulation. There is classification of recycle objects with the release of four types: recycle under “concentration”, “weight”, “weight and concentration”, as well as objects with “coordinate and parametric effect recycles”. The authors describe the structure of the object model to recycle for the first three classes in general. The control system for objects recycle under “weight” and the system of coordinate-parametric control object recycle are shown. The results of analytical and numerical studies, the results of the analysis of the effectiveness of control systems, as well as graphics transients under “feedforward control” and “target control” are represented in the paper.

**Keywords:** control object, positive feedback, object with recycle, automatic control systems, coordinate control, parameter control.

**DOI:** 10.15825/0368-0797-2015-5-381-385

## REFERENCES

1. Peitgen Heinz-Otto, Richter Peter H. *The Beauty of Fractals. Images of Complex Dynamical Systems*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1986. (Russ.ed.: Peitgen H., Richter P. *Krasota fraktalov. Obrazy kompleksnykh dinamicheskikh system*. Moscow: Mir, 1993. 176 p.)
2. Starovatskaya S.N., Tsiryapkina I.V., Myshlyaev L.P. Identification methods of material structures with fractals. *Fundamental'nye problemy sovremennoy materialovedeniya*. 2014, no. 3, vol. 11, pp. 290–293. (In Russ.)
3. Starovatskaya S.N., Myshlyaev L.P., Tsiryapkina I.V. *Materials structure description by fractal complex. External fields processing and treatment technology and preparation of nanostructure of metals and alloys: Book of the International seminar articles, 1 – 7 October 2014, Siberian State Industrial University*. Gromov V. ed. Novokuznetsk: Publishing Center SibSIU, 2014, p. 348.
4. Kiseleva M.Y., Smagin V.I. Model predictive control for discrete systems with state and input delays. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*. 2011, no. 1, pp. 5–12. (In Russ.)
5. Sim T.P., Hong G.S., Lim K.B. Modified Smith predictor with dementhon-horad pose estimation algorithm for 3D visual servoing. – *Robotica: Cambridge University Press*, 2002, no. 2, pp. 615–624.
6. Li Yi, Ko King-Tim, Chen Guanrong A Smith predictor based PI-controller for active queue management / *IEICE Transactions on communications. Oxford University Press*, 2005, no. 11, pp. 42–93.
7. Ray W. Harmon. *Advanced process control*. McGraw-Hill, New York etc. 1981, 326 p. (Russ.ed.: Ray W. *Metody upravleniya tekhnologicheskimi protsessami*. Moscow: Mir, 1983. 368 p.)
8. Letov A.M. *Dinamika poleta i upravlenie* [Flight dynamics and control]. Moscow: Nauka, 1969. 360 p. (In Russ.)
9. Guretskii Kh. *Analiz i sintez sistem upravleniya s zapazdyvaniem* [Analysis and synthesis of control system with the lagging]. Moscow: Mashinostroenie, 1974. 328 p. (In Russ.)
10. Myshlyaev L.P., Ivushkin A.A., G.P. Sazykin etc. *Sistemy avtomatizatsii na osnove naturno-model'nogo podkhoda: Monografiya v 3-kh t. T. 2. Sistemy avtomatizatsii proizvodstvennogo naznacheniya* [Automation systems on the basis of a full-scale model approach: Monography in 3 volumes. Vol. 2. Commercial automation systems]. Myshlyaev L.P. ed. Novosibirsk: Nauka, 2006. 483 p. (In Russ.)

**Acknowledgements.** The work was supported by the grant of RFBR according to the project no. 15-07-02231.

Received February 5, 2015

УДК 621.967.1:621.77

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЯ РЕЗАНИЯ НА НОЖНИЦАХ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ИЗОГНУТОЙ ПОЛОСЫ

**Никитин А.Г.**, д.т.н., доцент кафедры транспорта и логистики (nikitin1601@yandex.ru)

**Епифанцев Ю.А.**, к.т.н., доцент кафедры технической механики и графики

**Демина Е.И.**, аспирант кафедры транспорта и логистики

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

**Аннотация.** Предложена методика расчета усилия резания на ножницах предварительно изогнутой полосы. Определено, что при резке предварительно изогнутой полосы максимальное усилие резания меньше, чем при резке прямой полосы.

**Ключевые слова:** ножницы, усилие резания, предварительно изогнутая полоса.

**DOI:** 10.15825/0368-0797-2015-5-386-387

Для поперечной резки проката на станах применяют ножницы с параллельными ножами. Допускаемые размеры поперечного сечения проката, разрезаемого на ножницах такого типа, определяются максимальным усилием резания в холодном состоянии полосы, на которое рассчитаны ножницы.

Усилие резания на ножницах с параллельными ножами прямой полосы определяется следующим образом [1]:

$$P = \tau F, \quad (1)$$

где  $\tau$  – касательные напряжения, возникающие в процессе резания;  $F$  – площадь сечения разрезаемого материала.

Усилие резания достигает своего максимума при  $\tau = \tau_B$ , где  $\tau_B$  – предел прочности разрезаемого материала при действии касательных напряжений.

Очевидно, что чем меньше потребное усилие резания, тем меньше расход энергии. С целью уменьшения энергопотребления при резке проката в Сибирском государственном индустриальном университете разработали установку резки предварительно изогнутой полосы [2], на которой полоса в зоне резания под действием силы тяжести изгибается за счет того, что уровень отводящего рольганга (см. рисунок) расположен ниже уровня подводящего рольганга. В этом случае в полосе возникают нормальные напряжения, максимальные значения которых достигаются в крайних по вертикали волокнах, при этом в верхних во-

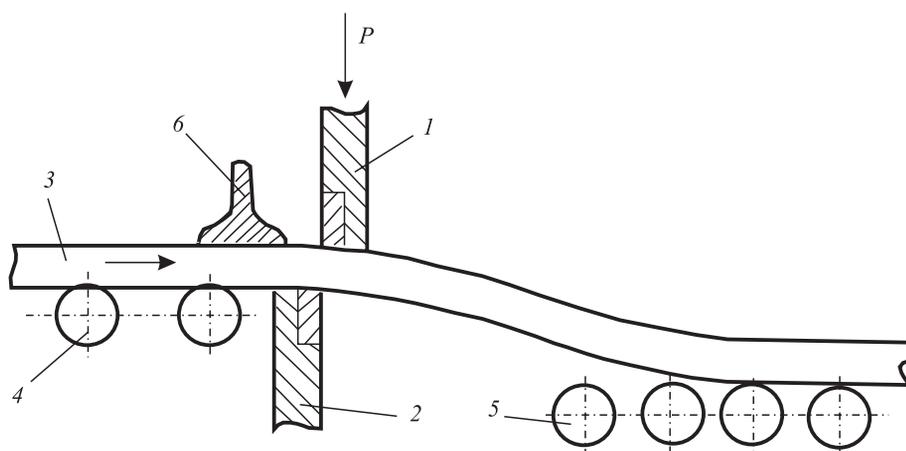


Схема устройства для резки предварительно изогнутой полосы:

1 – верхний нож; 2 – нижний нож; 3 – полоса; 4 – подводящий рольганг; 5 – отводящий рольганг; 6 – прижим

Scheme of the device for cutting of a pre-curved strip:

1 – upper knife; 2 – lower knife; 3 – strip; 4 – feed roller; 5 – discharge roller; 6 – clamp

локнах напряжения положительные, а в нижних – отрицательные.

При опускании верхнего ножа, когда начинается процесс резки проката, в полосе возникают как касательные напряжения, так и нормальные, т.е. в предварительно изогнутой полосе в зоне резания возникает сложное напряженное состояние, поэтому усилие резания определяется исходя из третьей гипотезы прочности [3]:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \leq \sigma_{\text{в}} \approx 2\tau_{\text{в}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\text{в}}$  – предел прочности при действии нормальных напряжений.

Тогда из выражения (2) с учетом уравнения (1) следует

$$\sqrt{\sigma^2 + 4\frac{P^2}{F^2}} \approx 2\tau_{\text{в}}. \quad (3)$$

Решая соотношение (3) относительно усилия резания, получим

$$P \approx \sqrt{\frac{4\tau_{\text{в}}^2 - \sigma^2}{4}} F^2 \approx \sqrt{\tau_{\text{в}}^2 - \frac{\sigma^2}{4}} F. \quad (4)$$

Из сравнения уравнений (1) и (4) видно, что максимальное усилие резания предварительно изогнутой полосы меньше, чем прямой полосы.

**Выводы.** Определено, что при резке на ножницах предварительно изогнутой полосы потребное усилие резки меньше, чем при резке прямой полосы, т.е. такой процесс более энергоэффективный.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Машины и агрегаты металлургических заводов / Под ред. А.И. Целикова. – М.: Металлургия. Т. 3. 1988. – 680 с.
2. Пат. № 91911 РФ. Устройство для резки проката / А.Г. Никитин, Е.Г. Белов, Л.М. Полторацкий // Изобретения. Полезные модели. 2010. № 7.
3. Беляев Н.М. Сопrotивление материалов. – М.: Наука. 1965. – 312 с.

Поступила 15 декабря 2014 г.

---

IZVESTIYA VUZov. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 5, pp. 386–387.

---

### THE DETERMINATION OF CUTTING FORCE ON THE SCISSORS AT PRE-CURVED STRIP CUTTING

*Nikitin A.G., Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair  
“Transport and Logistics” (nikitin1601@yandex.ru)*

*Epifanctev J.A., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the  
Chair “Technical mechanics and graphics”*

*Demina E.I., Postgraduate of the Chair “Transport and  
Logistics”*

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

**Abstract.** The method of calculation of the cutting force on the scissors at pre-curved strip cutting has been offered. It was determined that at maximum cutting force of pre-cutting curved strip is less than at cutting of the straight one.

**Keywords:** scissors, cutting force, pre-curved strip.

**DOI:** 10.15825/0368-0797-2015-5-386-387

#### REFERENCES

1. *Mashiny i agregaty metallurgicheskikh zavodov* [Machines and equipment for steel plants]. Tselikov A.I. ed. Vol. 3. Moscow: Metallurgiya. 1988. 680 p. (In Russ.).
2. Nikitin A.G., Belov E.G., Poltoratskii L.M. *Ustroystvo dlya rezki prokata* [A device for cutting of rolled products]. Patent RF no. 91911, *Byulleten' izobretenii*. 2010, no. 7. (In Russ.).
3. Belyaev N.M. *Soprotivlenie materialov* [strength of materials]. Moscow: Nauka. 1965. 312 p. (In Russ.).

Received December 15, 2014

Над номером работали:

Юсфин Ю.С., *главный редактор*

Протопопов Е.В., *заместитель главного редактора*

Ивани Е.А., *заместитель главного редактора*

Олендаренко Н.П., *заместитель ответственного секретаря*

Потапова Е.Ю., *заместитель главного редактора по развитию*

Бащенко Л.П., *ведущий редактор*

Запольская Е.М., *ведущий редактор*

Расенец В.В., *верстка, иллюстрации*

Кузнецов А.А., *системный администратор*

Острогорская Г.Ю., *менеджер по работе с клиентами*

---

Подписано в печать 19.05.2015. Формат 60×90 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бум. офсетная № 1.  
Печать цифровая. Усл. печ. л. 9,0. Заказ 4580. Цена свободная.

---

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