

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

# ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

---

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

---

№ 1, 2016

Издается с января 1958 г. ежемесячно

Том 59

---

# ИЗВЕСТИЯ

## ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

### ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

**Главный редактор:** ЛЕОНТЬЕВ Л.И.

(Российская Академия Наук, г. Москва)

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

(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

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

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

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

(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

#### Члены редакционной коллегии:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

#### Учредители:



Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»



Сибирский государственный индустриальный университет

Настоящий номер журнала подготовлен к печати

Национальным исследовательским технологическим университетом «МИСиС»

#### Адреса редакции:

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

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

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

# IZVESTIYA

VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA

IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY

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

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

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

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

## Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

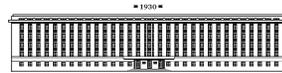
SPAIDEL' M. (Swiss Academy of Materials, Switzerland)

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

## Founders:



National Research  
Technological University "MISIS"



Siberian State  
Industrial University

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

## Editorial addresses:

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

### РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

- Павлов А.В., Римошевский В.С.** Способы утилизации отработанных молибденсодержащих катализаторов нефтехимического синтеза ..... 5

### МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Леонтьев Л.И., Григорович К.В., Костина М.В.** Фундаментальные исследования как основа создания новых материалов и технологий в области металлургии. Часть 1 ..... 11
- Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Синицкий Е.В., Горленко Д.А., Дуров Н.А.** Выплавка высокомарганцевой стали в дуговой сталеплавильной печи. Внепечная обработка. Сообщение 2 ..... 23
- Ливаткин П.А., Положенцев К.А.** Управление с помощью программного шага для вакуумной дуговой печи ..... 29
- Михайлов А.М., Зубарев К.А., Котельников Г.И., Семин А.Е., Григорович К.В.** Модель испарения компонентов никелевых сплавов при плавке в вакуумной индукционной печи ..... 35
- Савинов А.С.** Расчет на прочность отливки при формировании ее полости цилиндрическим стержнем ..... 39
- Панов А.Г., Цепелев В.С., Коначков В.В.** Исследование возможности повышения качества центробежнолитых чугуновых заготовок обработкой расплавов карбонатами ЦЗМ ..... 43

### ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ

- Еронько С.П., Ошовская Е.В., Ткачев М.Ю.** Исследование и совершенствование системы быстрой смены погружных стаканов промежуточного ковша слябовой МНЛЗ ..... 49
- Богатов А.А., Павлов Д.А., Павлова Е.А.** МКЭ – моделирование нового способа прокатки труб на короткой оправке с натяжением ..... 57

### ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

- Гончаренко Л.П., Филин С.А., Налесная Е.Е.** Механизмы стратегического управления рисками инвестирования в инновационные проекты в металлургической отрасли ..... 61

### КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Чичварин А.В., Тимофеева А.С., Крахт Л.Н., Смирнов А.Н., Игуменова Т.И.** Разработка рецептуры композитных наноструктурных гидрофобных покрытий для скрубберов обеспыливания ..... 66
- Хмелевская И.Ю., Кавалла Р., Комаров В.С.** Формирование наноструктуры никелида титана в результате квази-непрерывной изотермической деформации ..... 69

---

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 1

---

## CONTENTS

### RESOURCE SAVING IN FERROUS METALLURGY

- A.V. Pavlov, V.S. Rimoshevskii** Ways of utilization of spent petrochemical molybdenum catalysts ..... 5

### METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- L.I. Leont'ev, K.V. Grigorovich, M.V. Kostina** Fundamental Investigations as the Basis of Creation of New Materials and Technologies in Metallurgy. Part 1 ..... 11
- K.N. Vdovin, N.A. Feoktistov, E.V. Sinitskii, D.A. Gorlenko, N.A. Durov** High-manganese steel smelting in electric arc furnace. Ladle treatment. Report 2 ..... 23
- P.A. Livatkin, K.A. Polozhentsev** Operation with program step for vacuum arc furnace ..... 29
- A.M. Mikhailov, K.A. Zubarev, G.I. Kotel'nikov, A.E. Semin, K.V. Grigorovich** Model of evaporation of the components at the nickel alloys smelting in a vacuum induction furnace ..... 35
- A.S. Savinov** Calculations for the strength of casting at the formation of its cavity by cylindrical rod ..... 39
- A.G. Panov, V.S. Tsepelev, V.V. Konashkov** Research of the possibility of quality improvement of centrifugal casting billets made from cast-iron by processing of melts by alkaline earth metals carbonates ..... 43

### INNOVATIONS IN METALLURGICAL AND LABORATORY EQUIPMENT

- S.P. Eron'ko, E.V. Oshovskaya, M.Yu. Tkachev** Investigation and improvement of the rapid change system of submerged nozzle of slab CCM tundish ..... 49
- A.A. Bogatov, D.A. Pavlov, E.A. Pavlova** FEM simulation of a new method of lengthwise pipe rolling on a stub mandrel with stretch .... 57

### ECONOMIC EFFICIENCY OF METALLURGICAL PRODUCTION

- L.P. Goncharenko, S.A. Filin, E.E. Nalesnaya** Approaches for strategic risk management of investments in innovative projects in metallurgical industry ..... 61

### BRIEF COMMUNICATION

- A.V. Chichvarin, A.S. Timofeeva, L.N. Krakht, A.N. Smirnov, T.I. Igumenova** Development of formulations of composite nanostructured hydrophobic coatings for dedusting scrubbers ..... 66
- I.Yu. Khmelevskaya, R. Kavalla, V.S. Komarov** Formation of nanostructure in titanium nickelide as a result of quazi-continuous isothermal deformation ..... 69

УДК 669.054.8:669.28

## СПОСОБЫ УТИЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАННЫХ МОЛИБДЕНСОДЕРЖАЩИХ КАТАЛИЗАТОРОВ НЕФТЕХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

*Павлов А.В., д.т.н., профессор кафедры «Металлургия стали и ферросплавов» (pav-gnts@misis.ru)  
Римошевский В.С., магистрант (v.rimoshevsky@gmail.com)*

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

**Аннотация.** Выполнен обзор различных технологий переработки отработанных молибденосодержащих катализаторов нефтехимического производства. Для различных технологий переработки приведены количественные показатели степеней извлечения триоксида молибдена из отработанных катализаторов. Показано, что пирометаллургические и гидromеталлургические способы по отдельности не обеспечивают желаемой степени извлечения молибдена из отработанных катализаторов. Описаны преимущества и недостатки технологий прямого легирования стали отработанными катализаторами через шлаковую фазу. Предложена схема переработки катализаторов, прошедших гидроталлургический передел, в твердошлаковые смеси для рафинирования стали. Рассмотрен оптимальный способ комплексной переработки катализаторов. Предложены безотходная схема переработки отработанных катализаторов, а также использование молибдата кальция взамен ферросплавов на этапе обработки стали на установке ковш-печь.

**Ключевые слова:** отработанные катализаторы, молибден, пирометаллургия катализаторов, гидromеталлургия катализаторов, прямое легирование, экстракция, переработка катализаторов.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-5-10

На сегодняшний день порядка 75 % всех реакций в нефтехимической промышленности являются каталитическими. Используемые в нефтеперерабатывающих процессах промышленные катализаторы представляют собой одно-, двух-, трех- и четырехкомпонентные системы на базе оксидов цветных металлов [1].

Существует несколько способов получения катализаторов на основе окисных систем, включающих смешивание компонентов, формовку и последующее упрочняющее спекание [2]. При приготовлении катализаторов нанесение активного компонента чаще всего осуществляется путем пропитки пористого носителя раствором активного компонента с последующими стадиями сушки, прокалки и в некоторых случаях восстановления или сульфидирования [3].

В процессе эксплуатации активность катализаторов снижается в результате изменения структурных характеристик, механического экранирования, отравления, коксования и других причин [4].

Срок службы катализаторов зависит от многих факторов и колеблется от полугода до трех лет [5]. Отработанные катализаторы являются потенциально опасными отходами и их захоронение в грунт запрещено, так как накопление в почве приводит к существенному ухудшению экологической обстановки [6].

Отработанные катализаторы могут быть использованы в металлургии и смежных областях при условии предварительной обработки, в частности очистки от таких примесей, как сера, кокс и остатки нефтяных фрак-

ций. После первичной обработки в обжиговых печах, обеспечивающих очистку от вредных примесей, катализаторы могут быть использованы для прямого легирования стали, а так же для дальнейшей переработки с целью получения лигатур.

Значительный интерес представляют алюмокобальт-молибденовые катализаторы типа АКМ, содержащие 8 – 18 % Мо и до 4 % Со в виде оксидов, а также алюмоникельмолибденовые катализаторы типа АНМ, ГК-35 и ГО-117. Данные марки катализаторов эксплуатируются на нефтеперерабатывающих предприятиях [7].

Катализаторы гидроочистки различных видов нефтяного сырья основаны на универсальной композиции  $\text{Co(Ni)Mo(W)S}$  на носителе  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  [8].

Отработанные молибденосодержащие катализаторы содержат 5 – 20 % Мо, 1 – 5 % Со/Ни в виде оксидов, а так же 1 – 10 % S. Подобные катализаторы могут с успехом использоваться для легирования сталей через шлаковую фазу [9].

Так же существует ряд пиро- и гидromеталлургических технологий, позволяющих извлекать молибден, кобальт, никель из отработанных катализаторов, однако далеко не всегда одно- и двухступенчатые способы переработки обеспечивают достаточную степень извлечения полезных элементов, в связи с чем возникает необходимость разработки технологии переработки отработанных катализаторов, обеспечивающей максимальную степень извлечения полезных элементов, при этом являющейся экономически эффективной.

### Применение катализаторов для прямого легирования стали. Технология прямого легирования.

Молибденсодержащие лигатуры на основе отработанных катализаторов успешно применяются на промышленных предприятиях в качестве аналога ферромолибдена. Лигатуры позволяют частично уйти от необходимости использования ферромолибдена для ряда марок сталей. Под молибденсодержащими лигатурами понимаются отработанные катализаторы, прошедшие предварительную обработку. По данным работы [10], в лабораторных условиях усвоение молибдена из катализаторов при прямом легировании может достигать 98 %, а в производственном процессе показатель усвоения молибдена варьируется от 80 до 95 %.

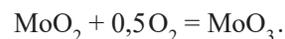
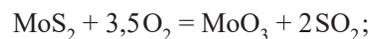
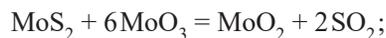
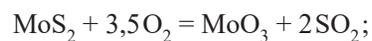
Добавка легирующего элемента происходит непосредственно в дуговой сталеплавильной печи (ДСП). В случае нехватки требуемого содержания молибдена в стали после легирования лигатурами, получение нужного содержания молибдена достигается путем добавления ферромолибдена.

Технология прямого легирования возможна благодаря тому, что молибден и ряд других легирующих элементов (W, Cu) обладают большим сродством к кислороду, чем железо, соответственно это приводит к беспрепятственному восстановлению оксидов данных металлов в печи, причем большинство реакций восстановления протекают экзотермически и не требуют дополнительной энергии для восстановления [11].

Основными проблемами при прямом легировании стали лигатурами на основе молибденсодержащих катализаторов являются высокое содержание серы в необоженных катализаторах и относительно низкое содержание молибдена, что приводит к необходимости использования ферромолибдена. Однако при использовании катализаторов для прямого легирования стали снижаются затраты на легирование, а так же решается проблема с захоронением отработанных катализаторов.

**Регенерация отработанных катализаторов вне колонн.** Зачастую регенерация катализаторов гидроочистки проводится в регенерационных колоннах крекинга нефти с целью восстановления их каталитической активности и повторного использования для нужд нефтехимии. Однако подобная регенерация без применения дополнительных технологий обеспечивает восстановление каталитической активности только 30 % катализаторов, остальные 70 % не пригодны для использования в нефтехимии и подлежат утилизации [12].

Основными задачами регенерации катализаторов вне колонн гидрокрекинга являются удаление серы из катализаторов, перевод молибдена из соединений  $\text{MoS}_2$  в  $\text{MoO}_3$  и удаление остатков нефтепродуктов. Обжиг проводится в трубчатых вращающихся печах при температуре 500 – 700 °С. Химические реакции, проходящие во время обжига катализаторов в трубчатой печи [13]:



**Пирометаллургическая переработка катализаторов.** Температура кипения триоксида молибдена составляет 1155 °С [14], что делает возможным получение чистого технического триоксида молибдена путем возгонки.

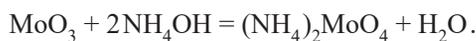
Скорость испарения триоксида молибдена зависит от количества примесей, содержащихся в катализаторах, наличие которых приводит к снижению давления паров триоксида молибдена и, как следствие, к снижению скорости его испарения [15]. Извлечение триоксида молибдена из катализаторов существенно ниже в случае высокого содержания кобальта в них. Это связано с тем, что при температурах возгонки образуются нелетучие молибдаты, в частности  $\text{CoMoO}_4$  [16], однако существует возможность извлечения триоксида молибдена из молибдата кобальта при помощи гидрометаллургических процессов.

Триоксид молибдена, полученный пирометаллургическим способом, имеет небольшую насыпную массу. Для ее повышения до 0,8 – 1,2 г/см<sup>3</sup> продукт растворяют в аммиачной воде и выделяют из раствора парамолибдат аммония. Преимуществом пирометаллургического способа переработки отработанных катализаторов гидроочистки является его относительно невысокая себестоимость производства  $\text{MoO}_3$  [17].

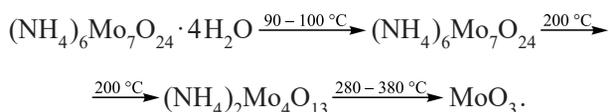
**Гидрометаллургическая переработка катализаторов.** Гидрометаллургический передел подразумевает под собой переработку катализаторов с целью получения триоксида молибдена путем выщелачивания аммиачной водой, содовым раствором и другими растворами, а также переработку обедненных катализаторов после извлечения триоксида молибдена. Конечным продуктом стадии гидрометаллургического передела могут являться парамолибдат аммония, триоксид молибдена или молибдат кальция.

Для большинства гидрометаллургических технологий предварительно катализаторы должны быть обожжены для повышения степени извлечения полезных элементов. Нахождение молибдена в форме сульфидов, диоксида и солей с никелем, кобальтом и алюминием затрудняет его выщелачивание [18].

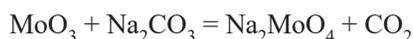
Для аммиачного выщелачивания характерна низкая степень извлечения молибдена в случае присутствия в катализаторах нерастворимых в аммиаке молибдатов, образовавшихся на предыдущих стадиях переработки. При обработке катализаторов раствором аммиака триоксид молибдена переходит в парамолибдат аммония [19]



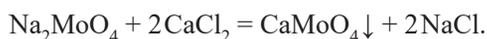
Впоследствии возможна дальнейшая прокалка парамолибдата при 400 °С для получения триоксида молибдена [20]



Содовое выщелачивание отличается более высокой степенью извлечения молибдена из-за возможности разложения некоторых молибдатов [21]. Однако для ряда марок катализаторов, в составе которых содержится много нерастворимых молибдатов, содовая и аммиачная технологии выщелачивания малоэффективны [22], но данные марки можно переработать по технологии спекания молибдена с содой и дальнейшего водного выщелачивания [23]



с последующим осаждением молибдена в виде молибдата кальция при помощи хлористого кальция



Полученный молибдат кальция может быть использован в качестве легирующего в черной металлургии.

Легирование молибдатом кальция предлагается проводить на этапе обработки стали на установке ковшепечь. При этом присутствующий в составе оксид кальция будет благотворно влиять на процесс наведения синтетического шлака и, соответственно, на процесс десульфурации.

По данным авторов работы [24] для повышения извлечения молибдена может быть использован раствор соды с добавлением окислителя. Так, при концентрации раствора 160 г/л  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  и 6 %  $\text{H}_2\text{O}_2$  извлечение за 60 мин составляет, %: 97,9 Mo; 85,0 V; 0,6 Ni; 4,9 Co и 1,9 Al.

Авторами работ [25, 26] предлагается перерабатывать отработанные катализаторы, содержащие от 4 до 10 % молибдена и никеля, подвергая их выщелачиванию аммиачно-карбонатными растворами при температуре 60 – 80 °С в течение 1 ч при Т:Ж = 3,5. Растворы от выщелачивания и промывки твердого остатка объединять и отправлять на дистилляцию и упаривание в присутствии сорбента для извлечения никеля. После упаривания и отгонки аммиака полученную пульпу предлагается фильтровать, раствор охлаждать и кристаллизовать из него парамолибдат аммония.

**Переработка катализаторов в твердошлаковые смеси (ТШС) после извлечения молибдена.** На сегодняшний день  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , содержащийся в катализато-

рах в большом количестве (до 85 % в обожженном катализаторе), при подаче катализаторов в завалку в ДСП теряется вместе с печным шлаком. В случае пирометаллургической или гидromеталлургической переработки катализаторов так же остается отход в виде практически чистого  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , тоже содержащего никель или кобальт (в зависимости от марки перерабатываемого катализатора). Представляется целесообразным использовать остатки предыдущих переделов переработки катализаторов в качестве компонентов ТШС для наведения рафинировочного шлака на установке ковшепечь или в качестве модификаторов. В этом случае вещество отработанных катализаторов будет полностью использоваться с получением существенного экономического эффекта.

**Предлагаемый способ переработки.** Представляется рациональной комплексная переработка катализаторов, состоящая из нескольких этапов и обеспечивающая наибольшее извлечение полезных элементов.

Первая стадия представляет собой окислительный обжиг при 600 °С, вторая стадия – пирометаллургическую переработку катализатора с извлечением большей части триоксида молибдена при 1250 °С. По предлагаемому способу обжиг катализаторов и возгонка проводятся в одном агрегате – электрической печи непрерывного действия с вращающимся подом. Нагрев осуществляется силитовыми стержнями, расположенными по периметру печи. Катализатор загружается на под печи. Первоначально происходит нагрев до 600 °С для проведения окислительного обжига. После снижения концентрации серы в катализаторах ниже 0,5 % температура в печи повышается до 1250 °С и начинается непосредственно процесс возгонки триоксида молибдена. Подаваемый в печь воздух уносит пары триоксида молибдена через ряд отверстий, расположенных на уровне пода, в общий коллектор, откуда через систему куллеров триоксид молибдена попадает на рукавные фильтры [27].

Потери при обжиге, по оценке, могут составить до 1 % по оксиду молибдена. Степень извлечения при пирометаллургической переработке на промышленных предприятиях составляет 80 %.

Как было показано в работе [28], при снижении содержания молибдена в катализаторах типа АКМ степень извлечения при содовом выщелачивании повышается, что связано с соблюдением локальных стехиометрических равновесий. В связи с этим представляется целесообразным проводить содовое выщелачивание молибдена после пирометаллургического передела.

Вторая стадия – гидromеталлургический передел с доизвлечением остаточного молибдена в виде парамолибдата аммония и молибдата кальция. Степень извлечения триоксида молибдена при гидromеталлургической обработке для катализаторов, содержащих малое количество оксида молибдена, составляет порядка 90 %.

Третья стадия – использование остатков гидрометаллургического передела в качестве компонентов ТШС. Предлагается изготавливать смесь, состоящую из 30 % катализаторов после выщелачивания, 30 % CaO, 25 % (CaMg)(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> и 15 % алюминиевой стружки, брикетировать компоненты и использовать полученные брикеты ТШС в качестве синтетического рафинировочного шлака на этапе обработки стали на установке ковшепечь. Данная композиция ТШС обеспечит защиту шлакового пояса (повысит износостойкость футеровки), раскисление стали алюминием, а так же десульфурацию и требуемую вязкость шлака.

Расчитан коэффициент сквозного извлечения триоксида молибдена с учетом потерь на каждой стадии и не учитывающий содержащийся в ТШС остаточный триоксид молибдена. На рис. 1, 2 приведены степени извлечения молибдена на различных стадиях переработки и его потери, а так же сводные данные по степеням извлечения молибдена на различных стадиях переработки. Коэффициент сквозного извлечения триоксида молибдена рассчитывается по следующей формуле:

$$I_{\text{общ}} = \frac{(C_0 - \sum P_i - C_{\text{тшс}})}{C_0} = 96 \%,$$

где  $P_i$  – потери на  $i$ -й стадии;  $C_0$  – начальное содержание молибдена в катализаторе;  $C_{\text{тшс}}$  – концентрация молибдена в ТШС.

Данные по степени извлечения триоксида молибдена и потерям для многостадийного процесса приведены в таблице. Таким образом, степень извлечения молибдена при использовании предложенной схемы переработки катализаторов составляет 96 %. При этом оста-

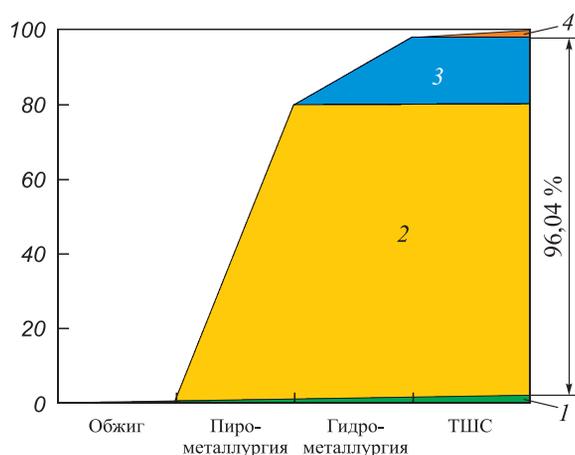


Рис. 1. Степень извлечения молибдена на различных стадиях переработки и потери по молибдену:

1 – потери по молибдену (2,00 %); 2 – возгонка (78,40 %); 3 – выщелачивание (17,64 %); 4 – молибден в ТШС (1,96 %)

Fig. 1. Extraction rate and loss of molybdenum at different stages of recycling:

1 – loss of molybdenum (2,00 %); 2 – sublimation (78,40 %); 3 – leaching (17,64 %); 4 – molybdenum in synthetic slag (1,96 %)

точное содержание молибдена в катализаторах может быть снижено до 0,3 %.

**Выводы.** Технология использования отработанных молибденсодержащих катализаторов на этапе завалки ввиду постоянного ужесточения требований к качеству стали, а так же неэффективного использования Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> не дает желаемого экономического эффекта. Пирометаллургические и гидрометаллургические методы по отдельности так же не обеспечивают желаемой степени извлечения молибдена из отработанных катализаторов. Многостадийный процесс позволит достичь степени извлечения молибдена до 96 %, а так же использовать остатки катализаторов, состоящие практически на 100 % из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, в ка-

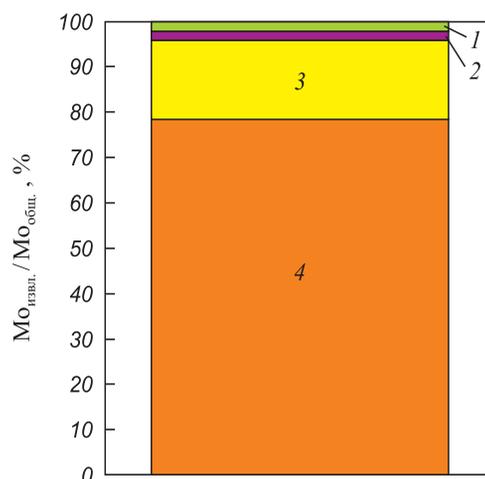


Рис. 2. Сводная информация по степеням извлечения молибдена на различных стадиях переработки:

1 – потери (2,00 %); 2 – в ТШС (1,98 %); 3 – гидрометаллургия (17,64%); 4 – пирометаллургия (78,41 %)

Fig. 2. Consolidated information about the extraction rates of molybdenum at different stages of recycling:

1 – loss (2.00 %); 2 – in synthetic slag (1.98 %); 3 – Hydrometallurgy (17.64%); 4 – Pyrometallurgy (78.41 %)

**Степень извлечения триоксида молибдена и потери для многостадийного процесса, % (данные приведены для начального содержания триоксида молибдена 16 %)**

**Extraction rate and losses of molybdenum trioxide at multistage process, % (data is given for initial molybdenum trioxide concentration – 16 %)**

	Обжиг	Возгонка	Выщелачивание
Содержание молибдена после передела	15,82	3,14	0,31
Степень извлечения Mo	0	80	90
Потери при переделе	1,0	0,7	0,3
Извлеченный молибден относительно начального содержания молибдена	0	78,4	17,64

честве компонента ТШС для наведения рафинировочного шлака на этапе обработке стали на установке ковш-печь.

Представляет интерес технология легирования стали молибдатом кальция вследствие низкой концентрации вредных примесей.

Внедрение технологий комплексной переработки катализаторов позволит снизить затраты на легирование стали, а так же экологическую нагрузку на окружающую среду.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Галевский Г.В., Руднева В.В., Коврова О.А. Плазмовосстановительная переработка нерегенерируемых катализаторов на основе оксидов цветных металлов. // Изв. вуз. Цветная металлургия. 1995. № 2. С. 9 – 13.
2. Мухленов И.П., Добкина Е.И., Дерюжкина В.И. Технология катализаторов / Под ред. И.П. Мухленова. – 2-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1979. – 325 с.
3. Лысова А.А. Исследование процесса приготовления катализаторов  $Co/\gamma-Al_2O_3$  методами ЯМР томографии и УФ-ВИД спектроскопии // В сб.: Всероссийская научная молодежная конференция «Химия под знаком “Сигма”»: исследования, инновации, технологии». – Омск, 2008. С. 145 – 147.
4. Шалиевский А.А., Красильникова К.Ф., Аниченко О.В., Юшкин А.В. Анализ процесса гидроочистки бензина // Modern high technologies. 2014. № 4. С. 172 – 173.
5. Скурко Р.И., Почерникова К.А. Производство синтетических катализаторов для нефтепереработки. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 120 с.
6. Медведев А.С., Малочкина Н.В., Ф.Ш. Балгаева Ф.Ш. Гидрометаллургический способ переработки отработанных катализаторов нефтеочистки // Научная сессия МИФИ-2007: Сб. науч. тр. Т. 9. – М., 2007. С. 136 – 137.
7. Томина Н.Н., Еремина Ю.В., Пимерзин А.А. и др. Каталитическое гидрооблагораживание нефтяных фракций на модифицированных алюминиймолибденовых катализаторах // Нефтехимия. 2004. Т. 44. № 4. С. 274 – 277.
8. Томина Н.Н., Пимерзин А.А., Монсеев И.К. Сульфидные катализаторы гидроочистки нефтяных фракций. // Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева. 2008. Т. 52. № 4. С. 41 – 52.
9. Леках С.Н., Трибушевский В.Л., Слуцкий А.Г. Легирование чугуна из шлаковой фазы // Литейное производство. 1985. № 10. С. 23 – 24.
10. Леках С.Н. Ресурсосберегающие технологии получения высококачественных чугунов для машиностроительных отливок. – Минск: Наука и техника, 1991. – 223 с.
11. Корытов М.С., В.В. Евстифеев В.В. Технология конструкционных материалов: Учебное пособие. – Омск: изд-во СибАДИ, 2010. – 240 с.
12. Лебедев Б.Л., Князьков А.Л., Осипов Л.Н. и др. Итоги промышленной эксплуатации катализатора ОД-17Р при гидроочистке смеси прямогонной дизельной фракции и легкого каталитического газойля // Нефтепереработка и нефтехимия. 2001. № 2. С. 13 – 15.
13. Shigegaki Y., Basu S.K., Wakihara M., Taniguchi M. Thermal Analysis and Kinetics of Oxidation of Molybdenum Sulfides // J. Therm. Analysis. 1988. Vol. 34. P. 1427 – 1440.
14. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник – Л.: Химия, 1977. – 175 с.
15. Петрищев А.С. Григорьев С.М. Термодинамика испарения оксидных соединений молибдена применительно к технологии производства молибденового концентрата: Сб. науч. тр. Донбасского государственного технического университета. 2011. Вып. 34. С. 149 – 157.
16. Медведев А.С., Малочкина Н.В., Балгаева Ф.Ш. Переработка отработанных молибденовых катализаторов гидроочистки // Тр. конф. «ВэйстТэк – 2007». – М., 2007.
17. Медведев А. С., Гостеева Н. В., Балгаева Ф. Ш. Пирометаллургический способ утилизации отработанных катализаторов гидроочистки: Сб. тр. V Междунар. конф. «Сотрудничество для решения проблемы отходов» – Харьков, 2008.
18. Аллабергенев Р.Д. // Фундаментальная и прикладная гидрометаллургия. – Ташкент, 2012. – 111 с.
19. Лидин Р.А. и др. Химические свойства неорганических веществ: Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., испр. – М.: Химия, 2000. – 480 с.
20. Мохосоев М. В., Базарова Ж. Г. Сложные оксиды молибдена и вольфрама с элементами I-IV групп. – М.: Наука, 1990. – 256 с.
21. Медведев А.С., Малочкина Н.В., Балгаева Ф.Ш. Способы переработки отработанных катализаторов // Цветные металлы. 2007. № 6. С. 78 – 82.
22. Колобов Г.А., Медведев А.С., Колмакова Л.П., Карпенко А.В. Новые технологии извлечения молибдена из отработанных катализаторов // Металлургия: наукові праці ЗДІА. Запоріжжя. 2014. Вып. 2 (32). С. 86 – 93.
23. Пат. 2180012 РФ. Способ использования побочных продуктов и отходов гидрометаллургического производства / Е.А. Халимонов, опубл. 27.02.2002.
24. Rokukawa N. Extraction of molybdenum and vanadium from spent desulphurization catalysts // J. Mining and Met. Inst. Jap. 1983. Vol. 99. No. 1145. P. 589 – 592.
25. Михнев А.Д., Пашков Г.Л., Дроздов С.В. и др. Извлечение молибдена и никеля из отработанных катализаторов // Цветные металлы. 2000. № 11 – 12. С. 90 – 93.
26. Михнев А.Д., Колмакова Л.П., Перфильева Н.С., Грачева Т.Е. Переработка дезактивированных молибденосодержащих катализаторов // Тез. докл. Всерос. науч.-практ. конф. «Редкие металлы и порошковая металлургия». – М.: МИСиС, 2001. С. 25 – 26.
27. Зеликман А.Н. Молибден. – М.: Металлургия, 1970. – 440 с.
28. Гостеева Н.В. Разработка технологии извлечения молибдена из отработанных катализаторов гидроочистки нефтепродуктов методами возгонки и выщелачивания: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2008. – 15 с.

Поступила 19 мая 2015 г.

IZVESTIYA VUZov. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. Vol. 59. No. 1, pp. 5–10.

#### WAYS OF UTILIZATION OF SPENT PETROCHEMICAL MOLYBDENUM CATALYSTS

*A.V. Pavlov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metallurgy of Steel and Ferroalloys” (pav-gnts@misiss.ru)*

*V.S. Rimoshevskii, MA student (v.rimoshevsky@gmail.com)*

**National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS)**  
(4, Leninskii ave., Moscow, 119049, Russia)

**Abstract.** The article gives an overview of different recycling technologies for exhaust catalysts. The quantitative indexes of extraction ratio of molybdenum are given. The reasons for the decline of molybdenum extraction rate from spent catalysts of pyrometallurgical and hydrometallurgical technologies are indicated. The advantages and disadvantages of technology of direct steel alloying by spent catalyst through the slag phase are described. The general scheme of tailings

recycling of hydrometallurgical and pyrometallurgical refining of spent catalysts were proposed, implying their use as components of the solid slag mixtures. The optimal ways of complex catalysts processing and waste-free scheme for spent catalysts processing are described. The use of calcium molybdate was proposed as ligature at the stage of steel processing at ladle furnace.

**Keywords:** exhaust catalysts, molybdenum, catalysts recycling, hydrometallurgical treatment of catalysts, pyrometallurgical treatment of catalysts, direct alloying, extraction.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-1-5-10

## REFERENCES

- Galevskii G.V., Rudneva V.V., Kovrova O.A. Reconstructive plasma processing of irrecoverable catalysts on the basis of non-ferrous metals oxides. *Izvestiya VUZov. Tsvetnaya metallurgiya*, 1995, no. 2, pp. 9–13. (In Russ.).
- Mukhlenov I.P., Dobkina E.I., Deryuzhkina V.I. *Tekhnologiya katalizatorov* [Technology of catalysts]. Mukhlenov I.P. ed. Leningrad: Khimiya, 1979. 325 p. (In Russ.).
- Lysova A.A. *Issledovanie protsessa prigotovleniya katalizatorov Co/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metodami YAMR tomografii i UF-VID spektroskopii* [Investigation of the process of catalyst preparation with a Co/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> by NMR imaging and UV-Vis spectroscopy]. In: *Vserossiiskaya nauchnaya molodezhnaya konferentsiya "Khimiya pod znakom "Sigma": issledovaniya, innovatsii, tekhnologii"*. Materialy. [The materials of All-Russian Scientific Youth Conference "Chemistry under the sign of "Sigma": research, innovation and technology"]. Omsk 2008, pp. 145–147. (In Russ.).
- Shalievskii A.A., Krasil'nikova K.F., Anishchenko O.V., Yushkin A.V. The analysis of the gasoline hydrotreatment. *Modern high technologies*. 2014, no. 4, pp. 172–173. (In Russ.).
- Skurko R.I., Pochernikova K.A. *Proizvodstvo sinteticheskikh katalizatorov dlya neftepererabotki* [Production of synthetic catalysts for oil refining]. Moscow: Gostoptekhizdat, 1963, p. 120. (In Russ.).
- Medvedev A.S., Malochkina N.V., Balgaeva F.Sh. *Gidrometallurgicheskii sposob pererabotki otrabotannykh katalizatorov nefteochistki* [The hydrometallurgical method for processing of spent catalysts of oil treatment]. In: *Nauchnaya sessiya MIFI-2007, sbornik nauchnykh trudov* [Scientific session of the MiFi-2007, a collection of scientific works]. Vol. 9, Moscow. 2007, pp. 136–137. (In Russ.).
- Tomina, N.N., Pimerzin, A.A., Loginova, A.N., Sharikhina, M.A., Zhilkina, E.O., Eremina, Yu.V. Catalytic hydrofining of petroleum fractions on modified nickel-molybdenum-alumina catalysts. *Petroleum Chemistry*, 2004. Vol. 44, no. 4, pp. 246–249.
- Tomina N.N., Pimerzin A.A., Moiseev I.K. Sulfide catalysts of petroleum fractions hydrotreating. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*. 2008. Vol. 52, no. 4, pp. 41–52. (In Russ.).
- Lekakh S.N., Tribushevskii V.L., Slutskii A.G. Iron doping from the slag phase. *Liteinoe proizvodstvo*. 1985, no. 10, pp. 23–24. (In Russ.).
- Lekakh S.N. *Resursosbergayushchie tekhnologii polucheniya vysokokachestvennykh chugunov dlya mashinostroitel'nykh otlivok* [Resource-saving production technologies of high quality iron castings for machine building]. Minsk: Nauka i tekhnika. 1991. 223 p. (In Russ.).
- Korytov M.S., Evstifeev V.V. *Tekhnologiya konstruktivnykh materialov* [Technology of construction materials]. Omsk. SibADI. 2010, p. 240. (In Russ.).
- Lebedev B.L., Knyaz'kov A.L., Osipov L.N. etc. The results of the industrial exploitation of the catalyst OD-17P in hydrotreatment of diesel fraction mixture of virgin and light catalytic gas oil. *Neftepererabotka i neftekhimiya*. 2001, no. 2, pp. 13–15. (In Russ.).
- Shigegaki Y., Basu S.K., Wakihara M. and Taniguchi M. "Thermal Analysis and Kinetics of Oxidation of Molybdenum Sulfides", *J. Therm. Analysis*, Vol. 34 (1988), pp. 1427–1440.
- Rabinovich V.A., Khavin Z.Ya. *Kratkii khimicheskii spravochnik* [Brief chemical handbook]. Leningrad: Khimiya, 1977 p. 81. (In Russ.).
- Petrishchev A.S., Grigor'ev S.M. *Termodinamika ispareniya oksidnykh soedinenii molibdena primenitel'no k tekhnologii proizvodstva molibdenovogo kontsentrata* [Thermodynamics of evaporation of molybdenum oxide compounds in relation to the production technology of molybdenum concentrate]. In: *Sbornik nauchnykh trudov Donbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Collection of scientific works of Donbass State Technical University]. 2011. Issue 34, pp. 149–157. (In Russ.).
- Medvedev A.S., Malochkina N.V., Balgaeva F.Sh. *Pererabotka otrabotannykh molibdenovykh katalizatorov gidroochistki* [Reprocessing of spent molybdenum hydrotreating catalysts]. In: *Materialy konferentsii "VeistTek – 2007"* [Proceedings of the conference "WasteTech – 2007" ]. Moscow. 2007. (In Russ.).
- Medvedev A.S., Gosteeva N.V., Balgaeva F.Sh. *Pirometallurgicheskii sposob utilizatsii otrabotannykh katalizatorov gidroochistki* [The pyrometallurgical utilization method of spent hydrotreatment catalysts]. In: *Sb. materialov V Mezhdunarodnoi konferentsii «Sotrudnichestvo dlya resheniya problemy otkhodov», 2-3 aprelya 2008* [Proceedings of the Vth International Conference "Cooperation for the solution of the waste problem" ]. Kharkiv, Ukraina. (In Russ.).
- Allabergenov R.D. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrometallurgiya* [Fundamental and applied hydrometallurgy]. Tashkent: 2012. p. 111. (In Russ.).
- Lidin R.A. etc. *Khimicheskie svoystva neorganicheskikh veshchestv: Ucheb. posobie dlya vuzov* [The chemical properties of inorganic substances: a manual for universities]. Moscow: Khimiya, 2000. 480 p. (In Russ.).
- Mokhosoev M. V., Bazarova Zh. G. *Slozhnye oksidy molibdena i vol'frama s elementami I-IV grupp* [Complex oxides of molybdenum and tungsten, with elements of I-IV groups]. Moscow: 1990. 256 p. (In Russ.).
- Medvedev A.S., Malochkina N.V., Balgaeva F.Sh. Processing methods for spent catalysts. *Tsvetnye metally*. 2007, no. 6, pp. 78–82. (In Russ.).
- Kolobov G.A., Medvedev A.S., Kolmakova L.P., Karpenko A.V. *Novye tekhnologii izvlecheniya molibdena iz otrabotannykh katalizatorov* [New technologies to extract molybdenum from spent catalysts]. In: *Metallurgiya: naukovyi pratsi ZDIA*. Issue 2 (32). Zaporizhia, 2014, pp. 86–93. (In Russ.).
- Khalimonov E.A. *Sposob ispol'zovaniya pobochnykh produktov i otkhodov gidrometallurgicheskogo proizvodstva* [Method of using by-products and waste of hydrometallurgical production]. Patent RF no. 2180012. Published 27.02.2002. (In Russ.).
- Rokukawa N. Extraction of molybdenum and vanadium from spent desulphurization catalysts. *J. Mining and Met. Inst. Jap*. 1983. Vol. 99, no. 1145, pp. 589–592.
- Mikhnev A.D., Pashkov G.L., Drozdov S.V. etc. Extraction of molybdenum and nickel from spent catalysts. *Tsvetnye metally*. 2000, no. 11–12, pp. 90–93. (In Russ.).
- Mikhnev A.D., Kolmakova L.P., Perfil'eva N.S., Gracheva T.E. *Pererabotka dezaktivirovannykh molibdensoderzhashchikh katalizatorov* [Processing of deactivated molybdenum catalysts]. In: *Redkie metally i poroshkovaya metallurgiya: Vseros. nauch.-prakt. konf., 3-5 dek. 2001: tez. dokladov* [Rare metals and powder metallurgy: Proc. of scientific and practical conf., December 3-5 ]. Moscow: MISIS, 2001, pp. 25–26. (In Russ.).
- Zelikman A.N. *Molibden* [Molibdenum]. Moscow: Metallurgiya. 1970, p. 440. (In Russ.).
- Gosteeva N.V. *Razrabotka tekhnologii izvlecheniya molibdena iz otrabotannykh katalizatorov gidroochistki nefteproduktov metodami vozgonki i vyshchelachivaniya. Avtoref. kand. diss.* [Development of extraction technology of molybdenum from spent catalysts of petroleum hydrotreatment by distillation and leaching methods. Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. 2008, 15 p. (In Russ.).

Received May 19, 2015

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

## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАК ОСНОВА СОЗДАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ В ОБЛАСТИ МЕТАЛЛУРГИИ. ЧАСТЬ 1

**Леонтьев Л.И.**<sup>1,2,3</sup>, академик РАН, советник Президиума РАН, д.т.н., профессор,  
главный научный сотрудник (lleontev@imet.ac.ru; leo@presidium.ras.ru)

**Григорович К.В.**<sup>2,3</sup>, член-корр. РАН, д.т.н., профессор, зав. кафедрой

«Металлургия стали и ферросплавов», зав. лабораторией (grigorov@imet.ac.ru)

**Костина М.В.**<sup>3</sup>, член-корр. РИА, д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник (mvk@imet.ac.ru)

<sup>1</sup> Президиум РАН

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

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

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

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

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

**Аннотация.** Приведен обзор разработанных учеными Российской академии наук новых металлических и керамических материалов и технологий, в том числе новых: высокопрочные коррозионностойкие азотсодержащие стали; жаропрочные и жаростойкие легкие сплавы и композиты на основе интерметаллидов; модификаторы для колесных сталей; комплексные V-, Cr-, Ni-содержащие ферросплавы, антикоррозионные защитные покрытия на основе ультратонких порошков Zn; каталитические нейтрализаторы отработавших газов автотранспорта; магнитотвердые материалы с высокой температурно-временной стабильностью и механическими характеристиками; наноструктурные стенты для эндоваскулярных операций в щадящем режиме; коррозионно- и износостойкие покрытия и способ их плазменного напыления. Разработаны способы: продольной прокатки с макросдвиговой деформацией для улучшения свойств проката; рециклинга замасленной окалины; контроля разгара огнеупорной футеровки в любой точке горна доменной печи, а также методы контроля чистоты рельсовых сталей по включениям. Разработаны процессы и технологии: спецэлектрометаллургии для получения стали для энергетики; синтеза массивных монокристаллических образцов нитридов переходных металлов, нанопорошков W, Pt, Ti и его карбидов и нитридов; переработки лейкоксеновых концентратов Ярегского месторождения; получения титановых имплантатов с пористыми покрытиями; дроби и порошков черных и цветных металлов; ультратонких порошков Zn; рециклинга отходов металлургического производства с извлечением Zn, Sb, Sn, Fe; получения агломерированных нанокристаллических порошков Ta для конденсаторов; переработки сульфидного Mo-содержащего сырья с получением PЗМ, MoO<sub>3</sub>, CaMoO<sub>4</sub> и утилизацией сернистого газа. Созданы инжекционные установки и технологии их применения, высокопроизводительная установка для плазменного напыления металлов, в том числе на лакокрасочные покрытия, пластмассы, картон. Получены данные о термодинамических функциях реакции растворения кислорода в расплавах на основе Fe и реакциях взаимодействия с кислородом растворенных в них элементов (Cr, Mn, Nb, V, Si, B, C, Ti, Zr, Al).

**Ключевые слова:** новые азотсодержащие стали, сплавы, интерметаллиды, покрытия, технологии, методы контроля, установки, порошки, плазменное напыление, рециклинг отходов, переработка сырья, расплавы.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-11-22

В данной работе показано несколько примеров успешной разработки новых материалов и технологий на основе фундаментальных исследований, проводимых учеными РАН. Эта тема особенно актуальна с учетом принятой стратегии импортозамещения, базирующейся на внедрении отечественных разработок. Теоретические основы разработок, их патентная защищенность изложены в литературе, перечень которой приведен ниже.

В ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН (научная школа академика РАН О.А. Банного и проф., д.т.н. В.М. Блинова) изучены физико-химические основы легирования сталей азотом и разработаны новые марки коррозионно-стойких высокопрочных азотсодержащих сталей, отвечающие современным требованиям по сочетанию высокой прочности с вязкостью, коррозионно- и изно-

состоятельностью. Как элемент внедрения, азот обеспечивает высокое твердорастворное упрочнение. В азотистых сталях возможно также дисперсионное твердение за счет выделения наноразмерных нитридов хрома CrN. Легирование азотом вносит вклад в повышение стойкости к локальным видам коррозии. Поскольку азот эффективно стабилизирует аустенит, введение азота в стали позволяет экономить дорогостоящие элементы-стабилизаторы аустенита – Ni, Co, Cu.

В числе прочих новых марок сталей в лаборатории конструкционных сталей и сплавов ИМЕТ РАН разработаны:

- Аустенитная литейная сталь 05X21AГ15Н8МФЛ. После гомогенизирующей термической обработки данная сталь превосходит применяющиеся в

России литейные аустенитные стали по пределу текучести в ~ 2 раза, по ударной вязкости в ~ 4,5 раза, по твердости на ~ 25 % [1, 2]. Рекомендуется для изготовления литой запорной и запорно-регулирующей арматуры (рис. 1) [3].

- Сталь мартенситного класса 05X16H5AB с 4–5 % Ni, ~ 0,11 – 0,17 % N. Сталь высокопрочная, свариваемая, коррозионно- и износостойкая [4 – 6]. Опробована для изготовления:
  - крепежных деталей (рис. 2), способных с успехом заменять аналогичные детали, изготовленные из титановых сплавов типа 6Al4V, BT16, BT35, нержавеющей сталей ЭИ 696М, ВНС-17, ЭИ 961, 07X16H6, 12X18H9Т и др., превосходя их по уровню прочности и более низкой стоимости конечного продукта [4, 6];
  - плоских пружин в составе электрического погружного насоса для добычи нефти и валов насосов, используемых при добыче нефти и газа. Заменяемый материал – сталь 12X18H10Т. Замена обеспечивает повышение ресурса работы пружин в 2 – 3 раза, валов – в 2,8 раз [6];
  - уплотнительных поверхностей запорных узлов криогенной арматуры (взамен стали 03X9K14H6M3Д = ЭП 921). Замена мартенситностареющей стали на азотсодержащую не снижает надежность и долговечность изделий [6]. Сталь 05X16H5AB и рекомендации по ее применению внесены в ГОСТ 5632-2014 от 24.10.2014 «Стали высоколегированные и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки».



Рис. 1. Литые заготовки для высокопрочной коррозионностойкой запорно-регулирующей арматуры из новой стали 05X21AG15H8MFL:

$\sigma_{0.2} = 400$  МПа;  $\sigma_B = 680$  МПа;  $\delta = 37$  %;  $\psi = 50$  %;  $KCV^{-70} = 1,8$  МДж/м<sup>2</sup>; критическая температура питтингообразования +43 °С (на 28° выше, чем у стали AISI 316)

Fig. 1. Cast billets for high strength corrosion-resistant valves of new 05Kh21AG15N8MFL steel:

$\sigma_{0.2} = 400$  МПа;  $\sigma_B = 680$  МПа;  $\delta = 37$  %;  $\psi = 50$  %;  $KSV^{-70} = 1.8$  MJ/m<sup>2</sup>; critical pitting temperature +43 °C (by 28° higher than for AISI 316 steel)

Одной из основных причин досрочного вывода из эксплуатации рельсов и вагонных колес являются контактно-усталостные дефекты, связанные с наличием в металле крупных неметаллических включений (в первую очередь с высоким содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), являющихся концентраторами напряжений [7] и причиной образования контактно-усталостных дефектов. Поэтому актуальной задачей при повышении эксплуатационного ресурса рельсов и колес является повышение чистоты сталей транспортного назначения по оксидным недеформируемым неметаллическим включениям (НВ). Одним из основных процессов, оказывающих решающее влияние на металлургическое качество стали, является процесс раскисления [8]. Как известно, основной задачей процесса раскисления стали является снижение концентрации общего и растворенного в металле кислорода за счет связывания его в прочные оксиды при вводе в металл раскислителей и удаления образующихся при этом оксидных НВ. Конечное содержание кислорода в металле, состав, морфология и вид размерного распределения НВ в твердом металле определяются применяемыми раскислителями, их составом, количеством, последовательностью и способом введения в расплав [9].

Термодинамическим анализом и экспериментальными исследованиями впервые получены данные о термодинамических функциях реакции растворения кислорода в многокомпонентных расплавах на основе железа и реакциях взаимодействия растворенных в этих расплавах элементов-раскислителей с кислородом: хрома [10 – 12]; марганца [13, 14]; ниобия [15 – 17]; ванадия [18 – 20]; кремния [13, 21, 22]; бора [23]; углерода [24 – 26]; титана [27, 28]; циркония [29, 30]; алюминия



Рис. 2. Болты из высокопрочной (классы прочности 8.8. – 10.9) и коррозионностойкой азотистой стали 05X16H5AB, не склонной к межкристаллитной коррозии, полученные методом холодной высадки на заводском оборудовании (АО «Завод Нормаль», г. Нижний Новгород)

Fig. 2. Bolts of high-strength (strength class 8.8. – 10.9) and nitrous stainless 05Kh16N5AB steel not susceptible to ICC, obtained by cold heading at the plant equipment (JSC “Plant Normal”, Nizhny Novgorod)

[31, 32]. Полученные данные могут быть использованы для оптимизирования существующих и создания новых технологий выплавки сталей и сплавов.

Одним из перспективных путей повышения металлургического качества сталей может являться введение новых модификаторов на основе Ва и Са–Ва лигатур. По отношению к кальцию барий близок по физико-химическим свойствам, но обладает рядом преимуществ с технологической точки зрения. В ходе обработки им металла обеспечиваются условия для эффективного взаимодействия с расплавом. Проведенные промышленные эксперименты по раскислению и модифицированию колесной стали различными вариантами барийсодержащих лигатур показали (рис. 3), что использование модификаторов Sibar<sup>®</sup>22, Insteel<sup>®</sup>1.2 и Insteel<sup>®</sup>1.3 в стальной оболочке в условиях массового металлургического производства приводит к значительному повышению чистоты стали по НВ за счет лучших условий их ассимиляции шлаком [33]. Существенно снижается средний размер оксидных НВ (барий был обнаружен в НВ размером менее 10 мкм, что свидетельствует о достаточно полном удалении крупных НВ из расплава в течение сравнительно короткого времени). Учеными ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН показано, что применение Ва-содержащих лигатур при производстве колесной стали приводит к повышению уровня ударной вязкости при сохранении высокой твердости и прочности. Обработка колесной стали Ва-содержащими модификаторами позволила добиться снижения показателей за-

грязненности металла по всем видам НВ и суммарного брака колес на 69,6 % отн. по сравнению с отчетными данными плавов по действующей технологии за такой же период времени (ОАО «Выксунский металлургический завод»).

В технологиях производства рельсовых, кордовых, трубных сталей и сталей для железнодорожных колес успех в значительной степени обеспечен разработкой методов достижения чистоты сталей по НВ и совершенствованием методик контроля. Широкое признание в практике получили разработанные в ИМЕТ РАН аналитические методики определения содержания и форм присутствия кислорода в сталях и порошках карбидов и нитридов тугоплавких металлов [34]. Разработанные методы контроля чистоты рельсовых сталей по НВ и нормы контроля введены в новый ГОСТ Р 51685-2015 «Рельсы железнодорожные».

Учеными ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН в содружестве с машиностроительным концерном ОРМЕТО-ЮУМЗ, ОАО «ЦНИИТМАШ», Энергомаш-БЗЭМ, НПФ «Ком-терм» РАН была создана инновационная ресурсосберегающая технология спецэлектрметаллургии для получения стали особого назначения (паропроводы острого пара, роторы турбогенераторов атомной и тепловой энергетики, высокостойкие прокатные валки). Технология основана на применении низкой частоты тока, дифференцированных электрических и шлаковых режимах. Она обеспечила повышение физической и химической однородности крупных заготовок до трех раз,

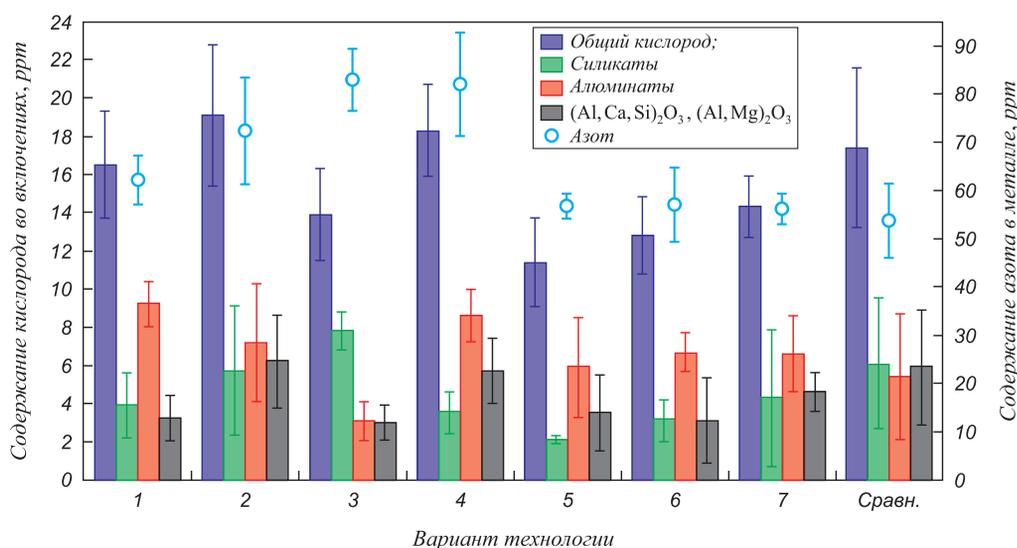


Рис. 3. Сравнение результатов определения фракционного газового анализа кислорода и общего содержания азота в образцах, отобранных из темплетов колесной стали, сгруппированных по вариантам модифицирования:

- 1 – 2 – ввод проволоки Sibar<sup>®</sup>22 с содержанием бария до 30 % и расходом модификатора 0,58 и 0,83 кг/т соответственно;  
 3 – 4 – ввод модификатора Insteel<sup>®</sup>1.2 с содержанием бария до 15 % и расходом модификатора 0,43 и 0,62 кг/т соответственно;  
 5 – 7 – ввод модификатора Insteel<sup>®</sup>1.3 с содержанием бария до 20 % и расходом модификатора 0,52, 0,58 и 0,83 кг/т соответственно

Fig. 3. Comparison of the definition of fractional gas analysis (PHA) of oxygen and total nitrogen in the samples taken from templates of industrial designs of wheel steel, grouped according to the modification types:

- 1 – 2 – input of Sibar<sup>®</sup>22 wire with barium content of 30 % and modifier consumption – 0.58 and 0.83 kg/t, respectively;  
 3 – 4 – input of Insteel<sup>®</sup>1.2 modifier with barium content of 15 % and modifier consumption – 0.43 and 0.62 kg/t, respectively;  
 5 – 7 – input of Insteel<sup>®</sup>1.3 modifier with barium content up to 20 % and modifier consumption – 0.52, 0.58 and 0.83 kg/t, respectively

первичной кристаллической структуры до четырех раз, снижение анизотропии свойств по высоте и сечению заготовок с 2,5 – 3 до 1 – 1,2. Впервые в мире освоено изготовление полых заготовок длиной до 9 м в литом и малодеформированном состоянии для энергетического и атомного машиностроения. Результаты работы позволили ориентировать теплоэнергетику на создание новых энергоблоков с суперсверхкритическими параметрами пара (давление 30 – 35 МПа, температура 600 – 650 °С), что позволит увеличить КПД электростанций на 3,9 %. Работа удостоена премии Правительства РФ в области науки и техники за 2013 г.

На основании исследований взаимодействия плазмы с веществом в ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН разработаны физико-химические и конструктивно-технологические основы процессов плазмохимического синтеза нанопорошков W, Pt, Ti и его карбидов и нитридов, а также плазмохимической технологии переработки лейкоксеновых концентратов Ярегского месторождения [35 – 37].

Учеными ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН в содружестве ФГУП «ВИАМ», ФГУП «ЦНИИЧЕРМЕТ» и рядом авиационных предприятий и двигателестроительных заводов разработаны физико-химические принципы создания конструкционных жаропрочных и жаростойких легких сплавов и композитов на основе легких тугоплавких интерметаллидов, предназначенных для работы при температурах, превышающих не только рабочие температуры (1100 °С), но и температуры плавления (1290 – 1340 °С) жаропрочных никелевых сплавов. Разработаны основы технологических процессов их получения и термической или термопластической обработки, обеспечивающие формирование в изделиях оптимальных структурно-фазовых состояний. Литейные жаропрочные сплавы – естественные композиты на основе  $Ni_3Al$  с направленно закристаллизованной структурой, рабочими температурами до 1250 – 1300 °С и плотностью не выше 7,9 г/см<sup>3</sup>, что на ~15 % ниже плотности никелевых сплавов, которые используются в авиационном двигателестроении [38 – 40]. Порошковые деформируемые теплоустойчивые сплавы системы  $NiAl-Y_2O_3$  с направленно рекристаллизованной структурой (с плотностью 5,9 г/см<sup>3</sup>, что на 30 % ниже, чем у сплавов Ni) предназначены для теплозащиты слабонагруженных деталей (воздухозаборники, корпуса, сопла перспективных гиперзвуковых прямоточных воздушно-реактивных двигателей, передние кромки, обшивка планера, теплозащитные панели аэрокосмических систем многоразового использования) [41, 42].

Методом окислительного конструирования тонкостенной керамики (ОКТК) впервые получены образцы монокристаллических нитридов металлов подгруппы титана, ранее доступные только в виде мелкодисперсных порошков или тонких пленок, изучены физические свойства таких материалов [43 – 45].

Методом ОКТК при взаимодействии азота с монокристаллическим цирконием синтезированы образцы

монокристаллического нитрида циркония. Показана принципиальная возможность получения массивных монокристаллических образцов нитридов переходных металлов без использования затравочных кристаллов соответствующих нитридов. Разработаны также каталитические нейтрализаторы отработавших газов автомобильного транспорта. Налажено опытное производство нейтрализаторов [46 – 48].

В ИМЕТ РАН ведутся работы по разработке и исследованию нового класса магнитотвердых материалов на основе системы железо–хром–кобальт, сочетающих высокие магнитные гистерезисные и механические свойства. Сплавы этого типа поддаются всем видам обработки металлов давлением, а в высокоэрозионном состоянии могут подвергаться лезвийной обработке. По своим прочностным свойствам превосходят все другие магнитотвердые материалы в 8 – 10 раз. В лаборатории пластической деформации металлов проведены комплексные исследования магнитных и механических свойств ряда магнитотвердых Fe–Cr–Co сплавов, позволивших организовать промышленное производство двух марок сплавов (22Х15К и 25Х15КЮБФ) в виде сортового и листового проката на заводе «Электросталь». С участием работников ИМЕТ РАН успешно организовано промышленное производство постоянных магнитов из новых сплавов для изделий ОПК (для системы залпового огня «Смерч», системы «Краснополь» и др.). Созданы магнитотвердые материалы с высокой температурно-временной стабильностью и механическими характеристиками (совместно с ФГУП «ВИАМ», ОАО НПО «Магнетон», ФГУП «Спецмагнит», ОАО НПО «Старт»). Данные материалы позволяют существенно улучшить характеристики систем управления и трехмерной ориентации самолетов и спутников [49 – 52]. В настоящее время ведутся разработки для новых систем высокоточного оружия совместно с Конструкторским бюро приборостроения им. академика А.Г. Шипунова.

Созданы наноструктурные стенты с повышенной биосовместимостью для эндоваскулярных операций, проводимых в щадящем режиме. Проводятся операции в специализированных медицинских центрах (внедрение: Российский онкологический научный центр им. Н.Н. Блохина РАМН, Научный центр сердечно-сосудистой хирургии им. А.Н. Бакулева РАМН) [53 – 56].

Совершенствованы научные основы улучшения свойств листового проката за счет макросдвиговой деформации в геликоидальных валках. В ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН разработан способ продольной прокатки с макросдвиговой деформацией, реализуемой специальной профилировкой прокатных валков в виде геликоида. При геликоидальной прокатке к существующей продольной деформации добавляется поперечная, а также деформация растяжения-сжатия частично заменяется на деформацию макросдвига. Поперечная деформация не изменяет размеров готовых полос и исходных заготовок по толщине [57 – 59].

Разработана технология получения титановых имплантатов для тазобедренного сустава с уникальной трехмерной системой наноструктурных капиллярно-пористых покрытий, обеспечивающих быстрое приживание имплантата в организме человека с образованием очень прочной связи имплантата с костью [60 – 62].

Институтом микробиологии (ИНМИ РАН) и ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН в результате совместных исследований была показана перспективность использования углеводородокисляющих микроорганизмов для решения важной практической задачи – рециклинга замасленной окалины. Максимально достигнутая степень очистки замасленной окалины – 94 % [63].

Совместно ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, ИМЕТ УрО РАН, ОАО «Челябинский цинковый завод», Институт экономики УрО РАН разработана технология процессов рециклинга техногенных отходов металлургического производства с извлечением цинка, свинца, олова и железа [64 – 69]. В 2010 – 2013 гг. утилизировано более 100 тыс. т отходов черной и цветной металлургии. При этом ежегодно извлекалось более 10 тыс. т цинка, 4 тыс. т свинца и олова, использовался в черной металлургии железосодержащий клинкер. Среди использованных отходов был цинкосодержащий (15 – 15 %) шлам электропечей ОАО «Северсталь». В промышленных условиях (Объединенная металлургическая компания (ОМК)) показана возможность повышения содержания цинка в пыли электродуговых печей с 10 до 25 – 30 %, что повысит показатели извлечения цинка. Работа удостоена премии Правительства РФ.

Внедрено микролегирование стали бором для повышения конкурентоспособности отечественной металлопродукции (ИМЕТ УрО РАН, ХМИ им. Ж.А. Абишева (Караганда), ИЭ УрО РАН). Для достижения малых концентраций бора в стали предложено вместо ферробора использовать ферросиликобор, ферросиликомарганецбор, что обеспечивает более высокую степень усвоения бора и более высокое качество металла [70, 71].

Разработанные в ИМЕТ УрО РАН коррозионно- и износостойкие покрытия, получаемые методом плазменного напыления, внедрены на следующих предприятиях: «Якутвоттранс» (Якутск); «Тюменьтрансгаз» (Югорск); Завод трансформаторов тока (Екатеринбург); НПФ «БИТЭК» (Екатеринбург); Котельно-радиаторный завод (Н. Тагил); ОМК и др. [72 – 74].

Технология и оборудование для получения дроби и порошков черных и цветных металлов внедрена на основании лицензионного договора на предприятии ООО «Инвест-Урал» (Нижний Тагил) (рис. 4).

В ИТЦ «Академический» (Научно-производственный холдинг ВМП, учредитель ИМЕТ УрО РАН) на основе фундаментальных исследований испарения и конденсации металлов созданы технология получения ультратонких порошков цинка и антикоррозионные защитные покрытия на их основе [75, 76]. Покрытия использованы в емкостях и трубопроводах нефтегазового

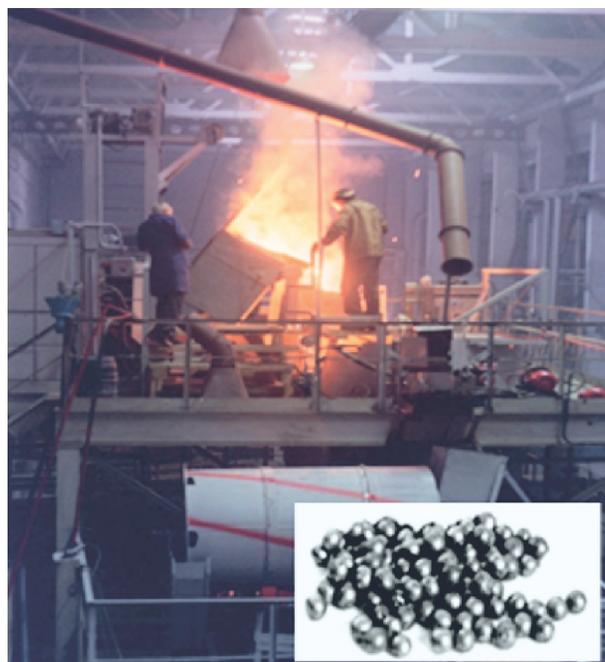


Рис. 4. Технология и оборудование для получения дроби и порошков черных и цветных металлов. ИТЦ «Академический», Научно-производственная фирма «Гран-Мет» (учредитель ИМЕТ УрО РАН)

Fig. 4. Technology and equipment for production of fractions and powders of ferrous and nonferrous metals. Research and Development Center “Academicheskii”, Scientific and Production Company “Grand Met”

комплекса на космодроме Куру (Французская Гвиана) для защиты металлоконструкций стартового комплекса для ракеты-носителя «Союз-СТ», на строительстве объектов инфраструктуры (мосты, путепроводы) зимних Олимпийских игр 2014 г. (Сочи) (рис. 5).

В ИМЕТ УрО РАН разработано аппаратное оформление и программное обеспечение постоянного контроля разгара огнеупорной футеровки в любой точке горна доменной печи [77], что позволяет увеличить кампанию печи до 20 и более лет, не допуская аварийных ситуаций – прорывов жидкого чугуна. Внедрена разработка на ряде доменных печей Китая по заказу китайской стороны [78].

В ИТЦ «Академический» при ИМЕТ УрО РАН создана принципиально новая безотходная технология комплексной переработки сульфидного молибденсодержащего сырья, реализованная на пилотной установке с получением редкоземельных элементов, триоксида молибдена, молибдата кальция и полной утилизацией сернистого газа [79, 80]. Опытные партии триоксида молибдена продаются на сталеплавильные предприятия.

Созданы инъекционные установки и технологии [81, 82]. На предприятия России и ближнего зарубежья продано 15 установок. В 2008 г. сотрудники ИМЕТ УрО РАН и ООО «НТМ» удостоены премии Правительства РФ за создание установок и освоение технологии их применения.



Рис. 5. Производство металлических порошков методом газофазного синтеза и материалов на их основе в ИТЦ «Академический»: а – производство порошка цинка; б – продукция для защиты поверхностей трения на основе бронзового порошка; в – производство цинкнаполненных красок

Fig. 5. Production of metal powders by gas-phase synthesis and materials based on them in Research and Development Center “Academicheskii”: а – production of zinc powder; б – products to protect the friction surfaces on the basis of bronze powder; в – production of zinc-rich paint

В ИМЕТ УрО РАН завершен цикл работ, включающий исследования физико-химических основ и разработку технологии переработки германийсодержащих зол от сжигания углей Павловского месторождения Приморского края, выдачу технологического регламента на проектирование и строительство отделения электроплавки на ООО «Германий и приложения». Начато промышленное производство нового вида германиевого концентрата [83].

Созданы комплексные ванадий-, хром-, никельсодержащие ферросплавы, ферроалюминий и ферросиликоалюминий, составы и технологии получения которых защищены патентами РФ [84, 85]. Все они получены с использованием отходов металлургического производства или нетрадиционных видов сырья малоотходными и экологически безопасными технологиями. Ферроалюминий используется в настоящее время более чем на десяти предприятиях России. Разработчики метода, сотрудники ИМЕТ УрО РАН, отмечены Премией им. В.Е. Грум-Гржимайло УрО РАН.

Институтом металлургии УрО РАН совместно с ООО «Технологии тантала» разработаны технология,

оборудование и получены опытные партии агломерированных нанокристаллических порошков тантала, предназначенных для использования в танталовых конденсаторах. Технические условия на производство импортозамещающих порошков тантала согласованы с производителем электролитических высоковольтных и чип-конденсаторов ОАО «Элеконд». Технология защищена двумя патентами РФ [86, 87]. Она позволяет получать нанопорошки других тугоплавких металлов и их карбидов. Показана возможность плакирования порошков и получения композиционных порошков для аддитивных технологий [88, 89].

В настоящее время в ИМЕТ УрО РАН находится в опытной эксплуатации плазменный стенд, на базе которого создается современная промышленная версия плазменной установки «Корвет-6», оборудованной специальной системой подготовки порошков для напыления с возможностью поддержания заданного регламента на сверхзвуковых и гиперзвуковых режимах [90, 91]. Установка предназначена для напыления наружных поверхностей с весовой производительностью до 30 кг/ч (площадь напыления ~150 м<sup>2</sup>/ч). Показана возможность

напыления металлов на лакокрасочные покрытия и даже на органическую основу (пластмассы, картон).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Костина М.В., Мурадян С.О., Хадыев М.С., Корнеев А.А. Исследование влияния термической обработки на структуру, фазовый состав и механические свойства новой литейной высокоазотистой коррозионностойкой Cr – Mn – Ni – Mo – N стали // *Металлы*. 2011. № 5. С. 33 – 48.
- Костина М.В., Мурадян С.О., Терентьев В.Ф. и др. Статическая и циклическая прочность аустенитной коррозионностойкой литейной Cr – Mn – Ni – Mo – N стали // *Металлы*. 2015. № 3. С. 34 – 44.
- Баннх О.А., Блинов В.М., Костина М.В. и др. О возможности применения в российском арматуростроении азотистых сталей // *Арматуростроение*. 2014. № 2 (89). С. 63 – 71.
- Баннх О.А., Блинов В.М., Костина М.В. и др. Высокопрочная коррозионностойкая азотистая сталь с наноструктурой для крепежных изделий // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2008. № 3. С. 90 – 95.
- Блинов В.М., Калинин Г.Ю., Костина М.В. и др. Влияние азота на коррозионные и коррозионно-механические свойства стали со структурой азотистого мартенсита // *Металлы*. 2003. № 4. С. 84 – 92.
- Костина М.В. Азотистые стали – новые материалы с уникальными свойствами // *Тр. науч.-практ. конф. с междунар. участием и элементами школы для молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР» (1 – 4 октября 2013 г.)*. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. С. 219 – 223.
- Григорович К.В., Гарбер А.К., Шибаев С.С. и др. Совершенствование технологии выплавки рельсовой стали с применением современных методов контроля неметаллических включений // *Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений (по материалам Рельсовой комиссии 2008 г.)*: Сб. науч. докл. – Екатеринбург: ОАО «УИМ», 2009. С. 150 – 168.
- Григорович К.В., Гарбер А.К. Анализ процессов комплексного раскисления расплавов углеродистых сталей // *Металлы*. 2011. № 5. С. 171 – 180.
- Григорович К.В., Шибаева Т.В., Арсенкин А.М. Влияние технологии раскисления трубных сталей на состав и количество неметаллических включений // *Металлы*. 2011. № 5. С. 164 – 170.
- Дашевский В.Я., Григорович К.В., Красовский П.В. и др. Влияние хрома на растворимость кислорода в никеле // *Доклады Академии наук*. 1998. Т. 359. № 2. С. 212 – 213.
- Dashevskii V.Ya., Kanevskii A.G., Makarova N.N. etc. Deoxidation Equilibrium of Chromium in Liquid Iron-Nickel Alloys // *ISIJ International*. 2005. Vol. 45. No. 12. P. 1783 – 1788.
- Александров А.А., Дашевский В.Я., Линчевский Б.В. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe – Co, содержащих хром // *Металлы*. 2014. № 5. С. 3 – 9.
- Dashevskii V.Ya., Katsnelson A.M., Makarova N.N. etc. Deoxidation Equilibrium of Manganese and Silicon in Liquid Iron-Nickel Alloy // *ISIJ International*. 2003. Vol. 43. No. 10. P. 1487 – 1494.
- Александров А.А., Дашевский В.Я. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe – Co, содержащих марганец // *Металлы*. 2014. № 1. С. 3 – 11.
- Александров А.А., Дашевский В.Я., Леонтьев Л.И. Растворимость кислорода в расплавах Fe – 40 % Ni, содержащих ниобий // *Доклады Академии наук*. 2013. Т. 452. № 2. С. 172 – 176.
- Александров А.А., Дашевский В.Я., Леонтьев Л.И. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe – Co, содержащих ниобий // *Доклады Академии наук*. 2015. Т. 464. № 2. С. 180 – 183.
- Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Kanevskii A.G., Leont'ev L.I. Deoxidation of Niobium in the Iron-Nickel Melts // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2015. Vol. 46B. No. 2. P. 220 – 225.
- Дашевский В.Я., Макарова Н.Н., Григорович К.В., Кашин В.И. Термодинамический анализ растворов кислорода в расплавах Fe – Ni, содержащих ванадий // *Металлы*. 1999. № 5. С. 10 – 15.
- Александров А.А., Дашевский В.Я., Леонтьев Л.И. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe – Co, содержащих ванадий // *Доклады Академии наук*. 2015. Т. 461. № 3. С. 291 – 294.
- Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Kanevskii A.G., Makarov M.A. Deoxidation Equilibrium of Vanadium in the Liquid Iron-Nickel Melts // *ISIJ International*. 2009. Vol. 49. No. 2. P. 149 – 155.
- Дашевский В.Я., Кацнельсон А.М., Макарова Н.Н., Кашин В.И. Термодинамика растворов кислорода в железоникелевых расплавах, содержащих Mn, Si, Al // *Доклады Академии наук*. 1996. Т. 346. № 2. С. 207 – 210.
- Александров А.А., Дашевский В.Я. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe – Co, содержащих кремний // *Металлы*. 2013. № 6. С. 21 – 25.
- Александров А.А., Дашевский В.Я. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe – Co, содержащих бор // *Металлы*. 2015. № 5. С. 41 – 51.
- Дашевский В.Я., Лякишев Н.П. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe – Ni, содержащих углерод // *Доклады Академии наук*. 2005. Т. 405. № 1. С. 1 – 4.
- Katsnelson A.M., Dashevskii V.Ya., Kashin V.I. Carbon activity Fe-, Co-, Ni- and Mn-based melts at 1873 K // *Steel Research*. 1993. No. 4. P. 197–202.
- Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Kanevskii A.G., Makarov M.A. Solubility Oxygen in Carbon-containing Fe-Ni Melts // *Rare Metals*. 2009. Vol. 28. October. Spec. Issue. P. 383–387.
- Дашевский В.Я., Макарова Н.Н., Григорович К.В., Кашин В.И. Термодинамика растворов кислорода в расплавах Fe – Ni, содержащих титан // *Металлы*. 1999. № 2. С. 3 – 11.
- Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Kanevskii A.G., Makarov M.A. Deoxidation Equilibrium of Titanium in the Liquid Iron-Nickel Melts // *ISIJ International*. 2010. Vol. 50. No. 1. P. 44 – 52.
- Дашевский В.Я., Александров А.А., Спрыгин Г.С., Леонтьев Л.И. Растворимость кислорода в расплавах системы Fe – Ni, содержащих цирконий // *Доклады Академии наук*. 2013. Т. 448. № 2. С. 174 – 177.
- Дашевский В.Я., Александров А.А., Леонтьев Л.И. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe – Co, содержащих цирконий // *Доклады Академии наук*. 2015. Т. 462. № 6. С. 671 – 674.
- Dashevskii V.Ya., Makarova N.N., Grigorovich K.V. etc. Deoxidation Equilibrium of Aluminum and Silicon in the Liquid Iron-Nickel Alloys // *ISIJ International*. 2005. Vol. 45. No. 1. P. 8 – 11.
- Александров А.А., Дашевский В.Я. Термодинамика растворов кислорода в расплавах системы Fe – Co, содержащих алюминий // *Металлы*. 2014. № 2. С. 16 – 22.
- Григорович К.В., Демин К.Ю., Арсенкин А.М., Гарбер А.К. Перспективы применения барийсодержащих лигатур для раскисления и модифицирования транспортного металла // *Металлы*. 2011. № 5. С. 146 – 156.
- Красовский П.В., Благовещенский Ю.В., Григорович К.В. Определение кислорода в нанопорошках системы W – C – Co // *Неорганические материалы*. 2008. Т. 44. № 8. С. 1 – 6.
- Николаев А.А., Кирпичев Д.Е., Николаев А.В., Цветков Ю.В. Сравнительный анализ металла, полученного при плазменно-дуговом жидкофазном восстановлении титаномагнетита метаном и углеродом // *Черная металлургия*. 2013. Вып. 10. С. 45 – 54.
- Цветков Ю.В., Самохин А.В., Николаев А.В. Плазменные процессы в металлургии и обработке материалов: Сб. ИМЕТ. 2013. С. 512.

37. Цветков Ю.В., Николаев А.А., Николаев А.В., Кирпичев Д.Е. Плазменная обработка рудных материалов сложного минералогического состава как инновационная технология, направленная на решение сырьевой и экологической проблем металлургического производства: Сб. ИМЕТ. 2013. С. 529.
38. Поварова К.Б., Бунтушкин В.П., Казанская Н.К. и др. Особо легкие жаропрочные наноструктурированные сплавы на основе  $Ni_3Al$  для авиационного двигателестроения и энергетического машиностроения // Вопросы материаловедения. 2008. № 2. С. 85 – 93.
39. Поварова К.Б., Дроздов А.А., Базылева О.А. и др. Влияние способа получения монокристаллов сплавов на основе  $Ni_3Al$  на макро- и микрооднородность распределения компонентов, структуру и свойства // Металлы. 2014. № 3. С. 40 – 51.
40. Поварова К.Б., Бондаренко Ю.А., Дроздов А.А. и др. Влияние направленной кристаллизации на структуру и свойства монокристаллов сплава на основе  $Ni_3Al$ , легированного Cr, Mo, W, Ti, Co, Re и PЗМ // Металлы. 2015. № 1. С. 50 – 58.
41. Povarova K.B., Skachkov O.A. Preparation, structure and properties of  $Ni_3Al$  and  $NiAl$  light powder alloys for aerospace // Materials science forum. Vol. 534 – 536 (2007). P. 1585 – 1588. <http://www.scientific.net>. © (2007) Trans tech publications, Switzerland.
42. Поварова К.Б., Скачков О.А., Дроздов А.А. и др. Механические свойства порошковых сплавов на основе системы  $NiAl - Y_2O_3$ , полученных направленной рекристаллизацией // Металлы. 2014. № 2. С. 44 – 50.
43. Шокодько А.В., Ашмарин А.А., Чернявский А.С. и др. Получение массивных образцов нитридов металлов с применением подхода окислительного конструирования // Перспективные материалы. 2013. № 3. С. 80 – 84.
44. Шокодько А.В., Ашмарин А.А., Чернявский А.С. и др. Получение компактного нитрида ванадия с применением подхода окислительного конструирования и исследование его свойств // Перспективные материалы. 2013. № 1. С. 80 – 84.
45. Кузнецов К.Б. Исследование морфологии нитрида циркония, полученного методом ОКТК: Сб. матер. VII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физикохимия и технология неорганических материалов». – М., 2010. С. 283.
46. Kuznetsov K.B., Shvorneva L.I., Solntsev K.A. Manufacturing and X-ray phase investigation into monolithic nitrides of zirconium and hafnium // Inorganic materials: Applied Research. 2010. Vol. 1. No. 1. P. 35 – 40.
47. Дробаха Е.А., Дробаха Г.С., Солнцев К.А. и др. Фазообразование при термообработке керамических покрытий в системах  $ZrO_2 - CeO_2 - Al_2O_3$ , полученных суспензионным способом на поверхности блочного носителя // Материаловедение. 2011. № 4. С. 25 – 29.
48. Пат. 2502561 РФ. Способ приготовления катализатора для очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания и катализатор, полученный этим способом / Г.С. Дробаха, Е.А. Дробаха, С.А. Дробаха, К.А. Солнцев; заявл. 28. 11. 2012., опубл. 27.12.2013. Бюл. № 36.
49. Устюхин А.С., Алымов М.И., Миляев И.М. Магнитные гистерезисные свойства  $Fe - 26Cr - 16Co$  порошковых магнитотвердых сплавов // Письма о материалах. 2014. Т. 4. № 1. С. 59 – 61.
50. Алымов М.И., Миляев И.М., Сычев А.Е. и др. Механоактивация порошковой шихты магнитотвердого  $Fe - Cr - Co$  сплава // Металлы. 2014. № 4. С. 61 – 67.
51. Пат. 2511136 РФ. Способ термической обработки магнитотвердых сплавов системы железо – хром – кобальт / И.М. Миляев, В.С. Юсупов, Н.В. Лайшева и др.; опубл. 10.04.2014. Бюл. № 10.
52. Вомпе Т.А., Миляев И.М., Юсупов В.С. Магнитные свойства магнитотвердых сплавов  $Fe - Cr - 10$  масс. %  $Co$  // Перспективные материалы. 2013. № 4. С. 59 – 63.
53. Заболотный В.Т., Белоусов О.К., Палий Н.А. и др. Материаловедческие аспекты получения, обработки и свойства никелида титана для применения в эндоваскулярной хирургии // Металлы. 2011. № 3. С. 47 – 59.
54. Заболотный В.Т., Колмаков А.Г., Севостьянов М.А., Насакина Е.О. Совершенствование медицинских изделий для эндоваскулярных операций // Интеграл. 2013. № 4(72). С. 42 – 45.
55. Насакина Е.О., Баикин А.С., Севостьянов М.А. и др. Свойства наноструктурного никелида титана и композита на его основе // Химическая технология. 2013. Т. 14. № 1. С. 14 – 23.
56. Sevost'yanov M.A., Fedotov A.Y., Kolmakov A.G. etc. Mechanical properties of nanostructured nitinol/chitosan composite material // Inorganic Materials: Applied Research. 2014. Т. 5. № 4. С. 344 – 346.
57. Карелин Ф.Р., Юсупов В.С., Чопоров В.Ф. и др. Продольная прокатка в геликоидальных валках // Сталь. 2011. № 3. С. 31 – 33.
58. Юсупов В.С., Губанова Н.В., Карелин Ф.Р., Чопоров В.Ф. Исследование процесса прокатки в геликоидальных валках методом математического моделирования в программе Defom 3D 24 // Металлы. 2011. № 2. С. 24 – 30.
59. Карелин Ф.Р., Юсупов В.С., Чопоров В.Ф., Колобов А.В. Разработка и исследование нового способа продольной прокатки в геликоидальных валках // Тр. IX Конгресса прокатчиков (16 – 18 апреля 2013 г.). – Череповец, 2013. С. 106 – 110.
60. Калита В. И., Самохин А.В., Алексеев Н.В. и др. Плазменные керметные покрытия с наноразмерным карбонитридом титана // Физика и химия обработки материалов. 2007. № 2. С. 37 – 45.
61. Калита В.И., Комлев Д.И. Исследование пористых покрытий на внутрикостных имплантатах // Физика и химия обработки материалов. 2008. № 2. С. 48 – 51.
62. Mamaeva V.A., Mamaev A.I., Dorofeeva T.I. etc. Nanostructured bioactive coatings on the titanium implants complex surface to stimulating osteosynthesis // 10 th International conference on modification of materials with particle beams and plasma flows (19 – 24 September 2010). – Tomsk, P. 608 – 611.
63. Борзенков И.А., Журина М.В., Тарасов А.Л. и др. Использование микробного потенциала для очистки замасленной окалины // Прикладная биохимия и микробиология. 2014. № 3. С. 304 – 330.
64. Теплов О.А., Воробаев И.Г., Дюбанов В.Г., Леонтьев Л.И. Кинетика восстановления электрометаллургического шлама водородом // Металлы. 2007. № 4. С. 11 – 20.
65. Теплов О.А., Леонтьев Л.И., Воробаев И.Г. и др. Цинксодержащие металлургические шламы: термографическое исследование и разработка технологии утилизации // Сталь. 2008. № 10. С. 123 – 127.
66. Dyubanov V.G., Leontiev L.I. About the problem of recycling of zinc-containing metallurgical slimes // Rare Metals. Vol. 28. Spec. Issue. Oct. 2009. P. 764 – 766.
67. Панышин А.М., Леонтьев Л.И., Козлов П.А. и др. Технология переработки пылей электродуговых печей ОАО «Северсталь» в вельц-комплексе ОАО «Челябинский цинковый завод» // Экология и промышленность России. 2012. Ноябрь. С. 2 – 4.
68. Гудкова И.Ю., Берестов А.С., Лемперт Д.Б. и др. О возможности выделения цинка из металлургических шламов с использованием процесса фильтрационного горения // Химическая физика. 2013. Т. 32. № 4. С. 1 – 9.
69. Пат. 2507280 РФ. Способ переработки цинксодержащих металлургических отходов / П.А. Козлов, А.М. Панышин, Л.И. Леонтьев и др. 2014. Бюл. № 5.
70. Жучков В.И., Сычев А.В., Бабенко А.А. и др. Разработка новых составов и методов получения борсодержащих ферросплавов: Сб. тр. XV Международ. науч.-практич. конф. – Темиртау, 2013. С. 392 – 396.
71. Степанов А.И., Бабенко А.А., Сычев А.В. и др. Отработка технологии микролегирования стали бором с использованием ферросиликобора // Металлург. № 7. 2014. С. 50 – 52.
72. Ильиных С.А., Киринос И.В., Крашанинин В.А., Гельчинский Б.Р. Физико-химические свойства покрытий, получаемых дозвуковым и сверхзвуковым плазменным напылением порошков металлов и их композиций // Изв. вуз. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2015. № 1. С. 49 – 54.
73. Гельчинский Б.Р., Ильиных С.А., Крашанинин В.А., Залесова О.Л. Защита металлических изделий, работающих в хими-

- чески агрессивных средах, путем создания комбинированных коррозионноустойчивых покрытий // Тез. Междунар. науч.-технич. конф. «Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России» (25 – 28 июня 2012 г.). – М.: ВИАМ, 2012.
74. Ильиных С.А., Гельчинский Б.Р., Крашанинин В.А., Залесова О.Л. Комбинированные коррозионно-износостойкие покрытия для защиты изделий от абразивного воздействия в химически агрессивных средах // XXI Всероссийская с международным участием науч.-технич. конф. «Быстрозакаленные материалы и покрытия»: Сб. тр. (27 – 28 ноября 2012 г.). – М., 2012. С. 74 – 78.
  75. Леонтьев Л.И., Залазинский Г.Г., Гельчинский Б.Р. и др. Технологии и оборудование для диспергирования металлов и инъекции материалов // *Металлург.* 2009. № 2. С. 65 – 71.
  76. Золотухина Л.В., Запечалов А.А., Жидовинова С.В. и др. Влияние ультра- и нанодисперсных порошков цинка и сплавов меди в пластической смазке на структуру и триботехнические свойства стальных поверхностей // *Трение и износ.* 2011. Т. 32. № 2. С. 150 – 156.
  77. Дмитриев А.Н., Чесноков Ю.А., Чэнь К. и др. Система контроля разгара огнеупорной футеровки горна доменной печи // *Сталь.* 2013. № 11. С. 8 – 14.
  78. Dmitriev A.N., Zolotykh M.O., Chesnokov Yu.A. etc. New monitoring system of the refractory lining wear in the blast furnace hearth // *Applied mechanics and materials.* 2014. Vol. 670–671. P. 1274–1284.
  79. Пат. 2296802 РФ. Способ извлечения молибдена из молибденосодержащего огарка / Г.Н. Кожевников, Ф.Г. Ситдииков, А.Г. Водопьянов; опубл. 10. 04. 2007. Бюл. № 10.
  80. Пат. 2291110 РФ. Способ получения молибдата кальция / Г.Н. Кожевников, Ф.Г. Ситдииков, А.Г. Водопьянов; опубл. 10. 01. 2007. Бюл. № 1.
  81. Лопатин В. Н., Леонтьев Л. И., Жучков В. И. и др. Конструкции и применение пневмотранспортного оборудования в металлургии. – Екатеринбург, 2007. – 170 с.
  82. Сычев А.В., Лопатин В.Н., Жучков В.И. Новое инжекционное оборудование и его применение в металлургии // *Материалы XIV Междунар. науч. конф. «Современные проблемы электрометаллургии стали».* – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2010. С. 68 – 73.
  83. Танутров И.Н., Свиридова М.Н. Научное обоснование, разработка и внедрение пирометаллургической технологии получения германиевых концентратов // *Цветные металлы.* 2014. № 2. С. 71 – 75.
  84. Пат. 2235142 РФ. Способ получения комплексного ванадийсодержащего сплава / О.Ю. Шешуков, В.И. Жучков, С.П. Бурмаков; опубл. 27. 08. 2004.
  85. Пат. 2241058 РФ. Шихта для выплавки ферросиликоалюминия / В.И. Жучков, Л.А. Маршук, Л.И. Леонтьев и др; опубл. 27. 11. 2004.
  86. Пат. 2397279 РФ. Способ получения порошков тугоплавких металлов / В.А.Костылев, Л.И. Леонтьев, В.Л. Лисин, С.А. Петрова; опубл. 20. 08. 2010. Бюл. № 23.
  87. Пат. 93805 РФ. Установка для электрохимического получения порошков тугоплавких металлов / В.А.Костылев, Л.И. Леонтьев, В.Л. Лисин, С.А. Петрова; опубл. 10. 05. 2010.
  88. Вараксин А.В., Лисин В.Л., Костылев В.А. и др. Получение наноразмерных и ультрадисперсных порошков металлов и их карбидов электрохимическим способом // *Бутлеровские сообщения.* 2014. Т. 37. № 1. С. 76 – 83.
  89. Вараксин А.В., Лисин В.Л., Костылев В.А. и др. Получение композиционных порошков, содержащих карбиды металлов // *Бутлеровские сообщения.* 2015. Т. 43. № 8. С. 102 – 110.
  90. Кирнос И.В., Чусов С.А., Ильиных С.А. и др. Разработка и создание экспериментального стенда для сверхзвукового напыления порошковых материалов // *Материалы XIV Междунар. науч.-технич. семинара (24 – 28. 02. 2014 г.). – Свалява – Киев: АТМ Украины, 2014. С. 83 – 86.*
  91. Кирнос И.В., Чусов С.А., Гельчинский Б.Р. Проблемы и перспективы освоения сверхзвукового плазменного напыления композиционных материалов // VII Междунар. симпозиум по теоретической и прикладной плазмохимии (3 – 7 сентября 2014, Плес, Россия): Сб. тр. – Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2014. С. 205 – 206.

Поступила 11 декабря 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. No. 1, pp. 11–22.

## FUNDAMENTAL INVESTIGATIONS AS THE BASIS OF CREATION OF NEW MATERIALS AND TECHNOLOGIES IN METALLURGY. PART 1

**L.I. Leont'ev**<sup>1, 2, 3</sup>, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician, Adviser of Presidium of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher* (lleontev@imet.ac.ru; leo@presidium.ras.ru)

**K.V. Grigorovich**<sup>2, 3</sup>, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Head of the Laboratory* (grigorov@imet.ac.ru)

**M.V. Kostina**<sup>3</sup>, *Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of Russian Academy of Engineering, Senior Researcher* (mvk@imet.ac.ru)

<sup>1</sup> **Scientific Council on Metallurgy and Metal Science of Russian Academy of Sciences (Department of Chemistry and Material Sciences)** (32a, Leninskii ave., Moscow, 119991, Russia)

<sup>2</sup> **National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS)** (4, Leninskii ave., Moscow, 119049, Russia)

<sup>3</sup> **Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences** (49, Leninskii ave., 119049, Moscow)

**Abstract.** The article provides an overview developed by the scientists of the Russian Academy of Sciences, on the basis of fundamental re-

search of new metallic and ceramic materials and technologies, including new nitrogen-containing high-strength corrosion-resistant steels, heat-resistant lightweight alloys and composites based on intermetallics; modifiers for wheel steels, complex V-, Cr-, Ni-containing ferroalloys; anti-corrosion protective coatings based on ultrathin Zn powders; catalytic converters of exhaust gases of vehicles; magnetically hard materials with high thermal and temporal stability and mechanical characteristics; nanostructural stents for endovascular operations in a sparing mode; corrosion – and wear-resistant coatings and method of their plasma spraying. The methods were developed for: longitudinal rolling with macroshift deformation (to improve the properties of sheet rolling); recycling of oiled scale; control of the lining deterioration at any point in the blast-furnace hearth. The monitoring methods for the integrity of rail steels by inclusions were carried out. The paper includes the developed processes and technologies of: special electro-metallurgy to produce the steel for the power industry; synthesis of the massive single-crystalline samples of nitrides of transition metals, nanopowders of W, Pt, Ti and Ti carbides and nitrides; processing of Yarega field leucogene concentrates; production of titanium implants with porous coatings; metallic fraction and powders of ferrous and non-ferrous metals; ultrafine Zn powders; recycling of metallurgical wastes with the extraction of Zn, Sb, Sn, Fe; obtaining agglomerated nanocrystalline powders of Ta for capacitors; processing of sulphide

Mo-containing raw materials and obtaining of rare earth metals,  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{CaMoO}_4$  and utilization of sulfur dioxide. The authors described the created injection installations and their application technologies; high-performance system for plasma spraying of metals, including paint coatings, plastics, cardboard. There were obtained the data on thermodynamic functions of the reaction of dissolution of oxygen in Fe-based molts and of the interaction reactions of dissolved in these molts elements (Cr, Mn, Nb, V, Si, B, C, Ti, Zr, Al) with oxygen.

**Keywords:** new nitrogen-containing steel, alloy, coating, technology, control methods, installation, powder, plasma spraying, waste recycling, processing of raw materials, melts.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-1-11-22

## REFERENCES

- Kostina M.V., Muradyan S.O., Khadyev M.S., Korneev A.A. Investigation of the effect of heat treatment on the structure, phase composition and mechanical properties of new corrosion casting high-nitrogen Cr-Mn-Ni-Mo steel. *Metally*. 2011, no. 5, pp. 33–48. (In Russ.).
- Kostina M.V., Muradyan S.O., Terent'ev V.F., Blinov E.V., Prosvirnin D.V. Static and cyclic strength of austenitic corrosion-resistant cast Cr-Ni-Mn-Mo-N steel. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2015, no. 5, pp. 367–375.
- Bannykh O.A., Blinov V.M., Kostina M.V., Blinov E.V., Muradyan S.O. On possibility of the use of nitrogen steel in the Russian valve industry. *Armaturostroenie*, 2014, no. 2(89), pp. 63–71. (In Russ.).
- Bannykh O.A., Blinov V.M., Kostina M.V., Vorob'ev I.A., Muradyan S.O. High-strength corrosion-resistant nitrous steel with nanostructures for fasteners. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*, 2008, no. 3, pp. 90–95. (In Russ.).
- Blinov V.M., Kalinin G.Yu., Kostina M.V., Mushnikova S.Yu., Popov V.I., Khar'kov A.A. Effect of nitrogen on the corrosion and corrosion-mechanical properties of steels with a nitrogen martensite structure. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2003, no. 4, pp. 360–366.
- Kostina M.V. Nitrous steel – new materials with unique properties. In: *Trudy Nauchno-praktich. konf. s mezhdunar. uchastiem i elementami shkoly dlya molodykh uchenykh "Perspektivy razvitiya metallurgii i mashinostroeniya s ispol'zovaniem zavershennykh fundamental'nykh issledovaniy i NIOKR" 1-4.10.2013 g* [Proceedings of Scientific-Practical. Conf. with int. participation and school items for young scientists "Prospects for the Development of Metallurgy and Machine Building with Completed Basic Research and R & D]. Ekaterinburg: OOO "UIPTs", 2013, pp. 219–223. (In Russ.).
- Grigorovich K.V., Garber A.K., Shibaev S.S. etc. Improving the rail steel smelting technology with the use of modern methods of control of non-metallic inclusions. In: *Uluchshenie kachestva i uslovii ekspluatatsii rel'sov i rel'sovykh skreplenii (po materialam Rel'sovoi komissii 2008 g.): Sbornik nauchnykh dokladov* [Improving the quality and conditions of rails and rail fasteners (Materials of Rail Commission 2008): Collection of scientific reports]. Ekaterinburg: OAO "UIM", 2009, pp. 150–168. (In Russ.).
- Grigorovich K.V., Garber A.K. Analysis of the complex deoxidation of carbon steel melts. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2011, no. 9, pp. 934–941.
- Grigorovich K.V., Shibaeva T.V., Arsenkin A.M. Effect of a pipe-steel killing technology on the composition and number of non-metallic inclusions. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2011, no. 9, pp. 927–933.
- Dashevskii V.Ya., Grigorovich K.V., Krasovskii P.V. etc. Effect of chromium on the solubility of oxygen in nickel. *DAN*. 1998, vol. 359, no. 2, pp. 212–213. (In Russ.).
- Dashevskii V.Ya., Kanevskii A.G., Makarova N.N., Grigorovich K.V. etc. Deoxidation Equilibrium of Chromium in Liquid Iron-Nickel Alloys. *ISIJ International*, 2005, vol. 45, no. 12, pp. 1783–1788.
- Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya., Linchevskii B.V. Thermodynamics of the oxygen solutions in chromium-containing melts of the Fe-Co system. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, no. 9, pp. 681–687.
- Dashevskii V.Ya., Katsnelson A.M., Makarova N.N., Grigorovich K.V. etc. Deoxidation Equilibrium of Manganese and Silicon in Liquid Iron-Nickel Alloy. *ISIJ International*. 2003, vol. 43, no. 10, pp. 1487–1494.
- Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya. Thermodynamics of the oxygen solutions in aluminum-containing Fe-Co melts. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, no. 3, pp. 185–190.
- Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya., Leont'ev L.I. Oxygen solubility in a niobium-containing Fe-40 % Ni melt. *Doklady Physical Chemistry*. 2013, vol. 452, no. 1, pp. 205–209.
- Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya., Leont'ev L.I. Thermodynamics of oxygen solutions in niobium-containing Fe-Co melts. *Doklady Physical Chemistry*. 2015, vol. 464, no. 1, pp. 206–209.
- Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Kanevskii A.G., Leont'ev L.I. Deoxidation of Niobium in the Iron-Nickel Melts. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2015, vol. 46B, no. 2, pp. 220–225.
- Dashevskii V.Ya., Makarova N.N., Grigorovich K.V., Kashin V.I. Thermodynamic analysis of oxygen solubility in Fe-Ni melts containing vanadium. *Russian Metallurgy (Metally)*. 1999, no. 5, pp. 9–18.
- Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya., Leont'ev L.I. Thermodynamics of oxygen solutions in vanadium-containing Fe-Co melts. *Doklady Physical Chemistry*. 2015, vol. 461, no. 1, pp. 53–56.
- Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Kanevskii A.G., Makarov M.A. Deoxidation Equilibrium of Vanadium in the Liquid Iron-Nickel Melts. *ISIJ International*. 2009, vol. 49, no. 2, pp. 149–155.
- Dashevskii V.Ya., Katsnel'son A.M., Makarova N.N., Kashin V.I. Thermodynamics of oxygen solutions in Fe-Ni Melts with Mn, Si, Al. *DAN*. 1996, vol. 346, no. 2, pp. 207–210. (In Russ.).
- Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya. Oxygen solubility in silicon-containing Fe-Co melts. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2013, no. 11, pp. 825–829.
- Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya. Thermodynamics of oxygen solutions in alloys of Fe-Co system, containing boron. *Metally*. 2015, no. 5, pp. 41–51. (In Russ.).
- Dashevskii V.Ya., Lyakishev N.P. Thermodynamics of oxygen solutions in carbon-containing Fe-Ni alloys. *Doklady Physical Chemistry*. 2005, vol. 405, no. 1–3, pp. 243–246.
- Katsnelson A.M., Dashevskii V.Ya., Kashin V.I. Carbon activity Fe-, Co-, Ni- and Mn-based Melts at 1873 K. *Steel Research*. 1993, no. 4, pp. 197–202.
- Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Kanevskii A.G., Makarov M.A. Solubility of oxygen in carbon-containing Fe-Ni melts. *Rare Metals*. 2009, vol. 28. October. Spec. Issue. P, pp. 383–387.
- Dashevskii V.Ya., Makarova N.N., Grigorovich K.V., Kashin V.I. Solution of oxygen in Fe-Ni melts containing titanium. *Russian Metallurgy (Metally)*. 1999, no. 1, pp. 1–14.
- Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Kanevskii A.G., Makarov M.A. Deoxidation Equilibrium of Titanium in the Liquid Iron-Nickel Melts. *ISIJ International*. 2010, vol. 50, no. 1, pp. 44–52.
- Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Sprygin G.S., Leont'ev L.I. Oxygen solubility in zirconium-containing melts of the Fe-Ni system. *Doklady Physical Chemistry*. 2013, vol. 448, no. 1, pp. 4–7.
- Dashevskii V.Ya., Aleksandrov A.A., Leont'ev L.I. Thermodynamics of oxygen solutions in the molten zirconium-containing Fe-Co system. *Doklady Physical Chemistry*. 2015, vol. 462, no. 2, pp. 131–134.
- Dashevskii V.Ya., Makarova N.N., Grigorovich K.V. etc. Deoxidation Equilibrium of Aluminum and Silicon in the Liquid Iron-Nickel Alloys. *ISIJ International*. 2005, vol. 45, no. 1, pp. 8–11.
- Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya. Thermodynamics of the oxygen solutions in aluminum-containing Fe-Co melts. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, no. 3, pp. 185–190.
- Grigorovich K.V., Demin K.Yu., Arsenkin A.M., Garber A.K. Prospects of the application of barium-bearing master alloys for the deoxidation and modification of a railroad metal. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2011, no. 9, pp. 912–920.

34. Krasovskii P.V., Blagoveshchenskii Yu.V., Grigorovich K.V. Determination of oxygen in nanopowders of WC-Co system. *Neorganicheskie materialy*. 2008, vol. 44, no. 8, pp. 1–6. (In Russ.)
35. Nikolaev A.A., Kirpichev D.E., Nikolaev A.V., Tsvetkov Yu.V., Comparative analysis of the metal, obtained in plasma-arc liquid-phase reduction of titanomagnetite by methane and carbon. *Byul. Chernaya Metallurgiya*. OAO Chermetinformatiya, 2013, Issue 10, pp. 45–54. (In Russ.)
36. Tsvetkov Yu.V., Samokhin A.V., Nikolaev A.V. Plasma processes in metallurgy and materials processing. In: *Sbornik trudov IMET im. A.A. Baikova RAN*. 2013, pp. 512. (In Russ.)
37. Tsvetkov Yu.V., Nikolaev A.A., Nikolaev A.V., Kirpichev D.E. Plasma processing of ore materials of complex mineralogical composition as an innovative technology aimed at the solution of the raw material and ecological problems of metallurgical production. *Sbornik trudov IMET im. A.A. Baikova RAN*. 2013, pp. 529. (In Russ.)
38. Povarova K.B., Buntushkin V.P., Kazanskaya N.K., Drozdov A.A., Bazyleva O.A. Especially light refractory nanostructured alloys on Ni<sub>3</sub>Al basis for aircraft engines and power engineering. *Voprosy materialovedeniya*. 2008, no. 2, pp. 85–93. (In Russ.)
39. Povarova K.B., Drozdov A.A., Bazyleva O.A., Bondarenko Yu.A., Bulakhtina M.A., Arginbaeva E.G., Antonova A.V., Morozov A.E., Nefedov D.G. Effect of the method of producing Ni<sub>3</sub>Al-based alloy single crystals on the macro- and microhomogeneity of component distribution, structure, and properties. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, no. 5, pp. 382–391.
40. Povarova K.B., Bondarenko Yu.A., Drozdov A.A., Bazyleva O.A., Antonova A.V., Morozov A.E., Arginbaeva E.G. Effect of directional solidification on the structure and properties of Ni<sub>3</sub>Al-based alloy single crystals alloyed with Cr, Mo, W, Ti, Co, Re, and REM. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2015, no. 1, pp. 43–50.
41. Povarova K.B., Skachkov O.A. Preparation, Structure, and Properties of Ni<sub>3</sub>Al and NiAl Light Powder Alloys for Aerospace. *Materials Science Forum*. Vols. 534–536 (2007) pp. 1585–1588. Available at URL: <http://www.scientific.net>. © (2007) Trans Tech Publications, Switzerland.
42. Povarova K.B., Skachkov O.A., Drozdov A.A., Morozov A.E., Pozharov S.I. Mechanical properties of NiAl–Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based powdered alloys produced by directional recrystallization. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, no. 3, pp. 210–214.
43. Shokod'ko A.V., Ashmarin A.A., Chernyavskii A.S., Shvorneva L.I., Ogarkov A.I., Konovalov A.A., Solntsev K.A. Preparation of compact vanadium nitride using the oxidative constructing approach and study of its properties. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2013, vol. 4, no. 5, pp. 464–467.
44. Shokod'ko A.V., Ashmarin A.A., Chernyavskii A.S., Shvorneva L.I., Yurkov G.Yu., Solntsev K.A. Production of compact vanadium nitride with oxidative design approach and investigation of its properties. *Perspektivnye materialy*. 2013, no. 1, pp. 80–84. (In Russ.)
45. Kuznetsov K.B. The research of Morphology of zirconium nitride obtained by OKTK. In: *Sbornik materialov VII Rossiiskoi ezhegodnoi konferentsii molodykh nauchnykh sotrudnikov i aspirantov "Fizikokhimiya i tekhnologiya neorganicheskikh materialov"* [Collection of Materials of the VII Annual Conference of the Russian Young Scientists and Graduate Students "Physical chemistry and technology of inorganic materials"]. Moscow: 2010, p. 283 (In Russ.)
46. Kuznetsov K.B., Shvorneva L.I., Solntsev K.A. Manufacturing and X-ray Phase Investigation into Monolithic Nitrides of Zirconium and Hafnium. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2010, vol. 1, no. 1, pp. 35–40.
47. Drobakha E.A., Drobakha G.S., Solntsev K.A., Shvorneva L.I., Kutsev S.V. Phase formation during the heat treatment of ceramic coatings in the systems of ZrO<sub>2</sub>–CeO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, obtained by suspension process on the surface of block carrier. *Materialovedenie*. 2011, no. 4, pp. 25–29. (In Russ.)
48. Drobakha G.S., Drobakha E.A., Drobakha S.A., Solntsev K.A. *Sposob prigotovleniya katalizatora dlya ochestki otrabotavshikh gazov dvigatelei vnutrennego sgoraniya i katalizator, poluchennyi etim sposobom* [Method of preparing catalyst for purification of exhaust gases of combustion engines and catalyst obtained thereof]. Patent RF no. S1 2502561 RU 2013. *Byulleten' izobretenii*. 2013, no. 36. (In Russ.)
49. Ustyukhin A.S., Alymov M.I., Milyaev I.M. Magnetic hysteresis properties of Fe-26Cr-16Co powder magnetic hard alloys. *Pis'ma o materialakh*. 2014, vol. 4, no. 1, pp. 59–61. (In Russ.)
50. Alymov M.I., Milyaev I.M., Sychev A.E., Kovalev D.Yu., Korneev V.P., Morozov Yu.G., Yusupov V.S., Vompe T.A. Mechanical activation of a hard magnetic Fe–Cr–Co alloy powder charge. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2014, no. 7, pp. 555–560.
51. Milyaev I.M., Yusupov V.S., Laisheva N.V., Milyaev A.I., Ryzhik M.P., Gorokhova L.N., Segal T.A. *Sposob termicheskoi obrabotki magnitoverdykh splavov sistemy zhelezo-khrom-kobalt'* [Heat treatment method of hard-magnetic alloys based on iron-chrome-cobalt system]. Patent RF no. 2511136. *Byulleten' izobretenii*, 2014, no. 10. (In Russ.)
52. Vompe T.A., Milyaev I.M., Yusupov V.S. Magnetic properties of Fe–Cr–10 wt.% Co magnetic hard alloys. *Perspektivnye materialy*. 2013, no. 4, pp. 59–63. (In Russ.)
53. Zabolotnyi V.T., Belousov O.K., Palii N.A., Goncharenko B.A., Armaderova E.A., Sevost'yanov M.A. Materials science aspects of the production, treatment, and properties of titanium nickelide for application in endovascular surgery. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2011, no. 5, pp. 437–448.
54. Zabolotnyi V.T., Kolmakov A.G., Sevost'yanov M.A., Nasakina E.O. Improvement of medical devices for endovascular operations. *Integral*. 2013, no. 4(72), pp. 42–45. (In Russ.)
55. Nasakina E.O., Baikina A.S., Sevost'yanov M.A., Kolmakov A.G., Zabolotnyi V.T., Solntsev K.A. Properties of nanostructured NiTi and composite based on it. *Khimicheskaya tekhnologiya*. 2013, vol. 14, no. 1, pp. 14–23. (In Russ.)
56. Sevost'yanov M.A., Fedotov A.Y., Kolmakov A.G., Zabolotnyi V.T., Barinov S.M., Goncharenko B.A., Komlev V.S., Baikina A.S., Sergienko K.V., Teterina A.Y., Nasakina E.O., Leonova Y.O., Leonov A.V. Mechanical properties of nanostructured nitinol/chitosan composite material. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2014, vol. 5, no. 4, pp. 344–346. (In Russ.)
57. Karelin F.R., Yusupov V.S., Choporov V.F., Gubanova N.V., Saraev D.Yu. Longitudinal rolling at helicoidal rolls. *Stal'*, no. 3, 2011, pp. 31–33. (In Russ.)
58. Gubanova N.V., Karelin F.R., Choporov V.F., Yusupov V.S. Study of rolling in helical rolls by mathematical simulation with the DEFORM 3D software package. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2011, no. 3, pp. 188–193.
59. Karelin F.R., Yusupov V.S., Choporov V.F., Kolobov A.V. Development and research of the new method of rolling at longitudinal helical rolls. In: *Trudy IX Kongressa prokatchikov, 16–18 aprelya 2013* [Papers of the 10th Congress of roller men]. Cherepovets: 2013, pp. 106–110. (In Russ.)
60. Kalita V. I., Samokhin A.V., Alekseev N.V., Yarkin V.V., Lubman G.U., Kasimov A.V., Komlev D.I. Plasma cermet coating with nano-sized titanium carbonitride. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2007, no. 2, pp. 37–45. (In Russ.)
61. Kalita V.I., Komlev D.I. The study of porous coating on the intraosseous implants. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*. 2008, no. 2, pp. 48–51. (In Russ.)
62. Mamaeva V.A., Mamaev A.I., Dorofeeva T.I., Kalita V.I., Komlev D.I., Gnedovetz F.G., Malanin D.A., Snigur L.I., and Krainov E.A. Nanostructured Bioactive Coatings on the Titanium Implants Complex Surface to Stimulating Osteosynthesis. *10th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk, Russian 19–24 September 2010*, pp. 608–611.
63. Borzenkov I.A., Zhurina M.V., Tarasov A.L., Belyaev S.S., Dyubanov V.G. Microbial potential for cleaning the oiled iron scale. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2014, vol. 50, no. 5, pp. 273–278.

64. Teplov O.A., Voropaev I.G., Dyubanov V.G., Leont'ev L.I., Hydrogen reduction kinetics of electrometallurgical slime. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2007, no. 4, pp. 268–275.
65. Teplov O.A., Leont'ev L.I., Voropaev I.G., Dyubanov V.G., Korneev V.P. Zinc-containing metallurgical sludges: thermographic research and development of recycling technology. *Stal'*. 2008, no. 10, pp. 123–127. (In Russ.).
66. Dyubanov V.G. and Leontiev L.I., About the problem of recycling of zinc-containing metallurgical slimes. *Rare Metals*, vol. 28, Spec. Issue, Oct. 2009, pp. 764–766.
67. Pan'shin A.M., Leont'ev L.I., Kozlov P.A., Dyubanov V.G., Zatonskii A.V., Ivakin D.A. Technology for processing of EAF dust of OJSC "Severstal" in the Waelz complex of OJSC "Chelyabinsk Zinc Plant". *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2012, no. 11, pp. 2–4. (In Russ.).
68. Gudkova I.Yu., Berestov A.S., Lempert D.B., Dyubanov V.G., Manelis G.B. On the possibility of zinc separation of sludge smelting process using filtration combustion. *Khimicheskaya fizika*. 2013, t. 32, no. 4, pp. 1–9. (In Russ.).
69. Kozlov P.A., Pan'shin A.M., Leont'ev L.I., Zatonskii A.V., Dyubanov V.G., Reshetnikov Yu.V. *Sposob pererabotki tsinksoderzhashchikh metallurgicheskikh otkhodov* [Method for processing of zinc-containing metallurgical waste]. Patent RF no. 2507280. 2014. *Byulleten' izobretenii*, no. 5. (In Russ.).
70. Zhuchkov V.I., Sychev A.V., Babenko A.A., Akberdin A.A., Kim A.S. Development of new compositions and methods for the preparation of boron-containing ferroalloys. In: *Sb. trudov XV mezhd. nauchno-prakticheskoi konferentsii, g. Temirtau, 2013* [Coll. of reports of XV Int. Scientific-practical conference, Temirtau]. pp. 392–396. (In Russ.).
71. Stepanov A.I., Babenko A.A., Sychev A.V., Zhuchkov V.I., Murzin A.V., Dresvyankina L.E., Ushakov M.V. Development of Technology for Microalloying Steel with Boron Using Ferro-Silicon-Boron. *Metallurgist*. 2014, vol. 58, no. 7–8, pp. 588–590.
72. Il'inykh S.A., Kirnos I.V., Krashaninin V.A., Gel'chinskii B.R. Physico-chemical properties of coatings obtained by the method before and supersonic plasma spraying of metal powders and their compositions. *Izvestiya VUZov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya*. 2015, no. 1, pp. 49–54. (In Russ.).
73. Gel'chinskii B.R., Il'inykh S.A., Krashaninin V.A., Zalesova O.L. Protection of metal products working in chemically aggressive conditions by creating combined corrosion-resistant coatings. In: *Tezisy mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii "Novye materialy i tekhnologii glubokoi pererabotki syr'ya – osnova innovatsionnogo razvitiya ekonomiki Rossii" Moskva, VIAM, 25–28 iyunya 2012* [Proceedings of the Int. Scientific Conference "New materials and technologies for deep processing of raw materials - the basis of innovative development of Russian economy"]. (In Russ.).
74. Il'inykh S.A., Gel'chinskii B.R., Krashaninin V.A., Zalesova O.L. Combined corrosion wear-resistant coating to protect the product from abrasive effects in chemically aggressive media. In: *11-ya Vserossiiskaya s mezhdunarodnym uchastiem nauchno-tehnicheskaya konferentsiya "Bystrozakalennyye materialy i pokrytiya". Moskva. 27-28 noyabrya 2012 goda. Sbornik trudov* [11th All-Russian Scientific Conference with international participation "Rapidly quenched materials and coatings"]. pp. 74–78. (In Russ.).
75. Leont'ev L.I., Zalazinskii G.G., Gel'chinskii B.R., Zhuchkov V.I., Lopatin V.N., Selivanov E.N. Processes and equipment for dispersal of metals and injection of materials. *Metallurgist*. 2009, vol. 53, no. 1–2, pp. 105–113.
76. Zolotukhina L.V., Zapevalov A.Ya., Zhidovinova S.V., Aref'ev I.G., Gel'chinskii B.R. Effect of ultra- and nanopowders of zinc and copper alloys in plastic lubrication on the structure and tribological properties of steel surfaces. *Trenie i iznos*. 2011, vol. 32, no. 2, pp. 150–156. (In Russ.).
77. Dmitriev A.N., Chesnokov Yu.A., Chen' K., Ivanov O.Yu., Zolotykh M.O. Monitoring the wear of the refractory lining in the blast-furnace hearth. *Steel in Translation*. 2013, vol. 43, no. 11, pp. 732–739.
78. Dmitriev A. N., Zolotykh M.O., Chesnokov Yu.A., Chen K., Ivanov O.Yu., Vitkina G.Yu. New Monitoring System of the Refractory Lining Wear in the Blast Furnace Hearth. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vols. 670–671, pp. 1274–1284.
79. Kozhevnikov G.N., Sitdikov F.G., Vodop'yanov A.G. *Sposob izvlecheniya molibdena iz molibdensoderzhashchego ogarka* [Method of extraction of molybdenum from molybdenum-containing cinder]. Patent RF no. 2296802. 2007. *Byulleten' izobretenii*, no. 10. (In Russ.).
80. Kozhevnikov G.N., Sitdikov F.G., Vodop'yanov A.G. *Sposob polucheniya molibdata kal'tsiya* [Method for preparing calcium molybdate]. Patent RF no. 2291110. 2007 *Byulleten' izobretenii*, no. 1. (In Russ.).
81. Lopatin V.N., Leont'ev L.I., Zhuchkov V.I., Sychev A.V., Vinogradov S.V. *Konstruktzii i primeneniye pnevmotransportnogo oborudovaniya v metallurgii* [Design and use of pneumatic conveying equipment in metallurgy]. Ekaterinburg: 2007, 170 p. (In Russ.).
82. Sychev A.V., Lopatin V.N., Zhuchkov V.I. New injection equipment and its application in metallurgy. In: *Sb. tr. Sovremennyye problemy elektrometallurgii stali. Materialy XIV Mezhd. nauch. konf.* [Coll. of reports. Modern problems of steel electrometallurgy. Materials XIV Int. Scientific Conf.]. Chelyabinsk: Izd. tsentr YuUrGU, 2010, pp. 68–73. (In Russ.).
83. Tanutrov I.N., Sviridova M.N. Scientific basis, development and implementation of pirometallurgical technology of obtaining of germanium concentrates. *Tsvetnye metally*. 2014, no. 2, pp. 71–75. (In Russ.).
84. Sheshukov O.Yu., Zhuchkov V.I., Burmasov S.P. *Sposob polucheniya kompleksnogo vanadiisoderzhashchego splava* [Method for production of complex vanadium alloy]. Patent RF no. 2235142, publ.: 27.08.2004 g. (In Russ.).
85. Zhuchkov V.I., Marshuk L.A., Leont'ev L.I. etc. *Shikhta dlya vyplavki ferrosilikoaluminiuma* [Charge for smelting of ferrosilicoaluminum]. Patent RF no. 2241058, publ.: 27.11.2004 g. (In Russ.).
86. Kostylev V.A., Leont'ev L.I., Lysin V.L., Petrova S.A. *Sposob polucheniya poroshkov tugoplavkikh metallov* [Procedure for production of powders of high-melting metals]. Patent RF no. 2397279. 2010. *Byulleten' izobretenii*, no. 23. (In Russ.).
87. Kostylev V.A., Leont'ev L.I., Lysin V.L., Petrova S.A. *Ustanovka dlya elektrokhimicheskogo polucheniya poroshkov tugoplavkikh metallov* [Installation for the electrochemical production of high-melting metal powders]. Patent RF no. 93805, publ.: 10.05.2010. (In Russ.).
88. Varaksin A.V., Lysin V.L., Kostylev V.A., Leont'ev L.I., Zakharov R.G., Petrova S.A. Electrochemical production of nanoscale and ultrafine powders of metals and metal carbides. *Butlerovskie soobshcheniya*. 2014, vol. 37, no. 1, pp. 76–83.
89. Varaksin A.V., Lysin V.L., Kostylev V.A., Leont'ev L.I., Zakharov R.G., Petrova S.A. Production of composite powder containing carbides of metals. *Butlerovskie soobshcheniya*. 2015, vol. 43, no. 8, pp. 102–110. (In Russ.).
90. Kirnos I.V., Chusov S.A., Il'inykh S.A., Gel'chinskii B.R., Krashaninin V.A., Chachin A.I. Design and creation of experimental stand for supersonic spraying of powdered materials. In: *Materialy 14-go Mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo seminar, 24-28.02.2014 g., Svalyava* [In: Proceedings of the 14th International Scientific and Technical Seminar, 24-28.02.2014, Svalyava]. Kiev: ATM Ukrainy, 2014, pp. 83–86. (In Russ.).
91. Kirnos I.V., Chusov S.A., Gel'chinskii B.R., Il'inykh S.A., Chachin A.I. Problems and prospects of development of supersonic plasma spraying of composite materials. In: *VII Mezhdunarodnyi simpozium po teoreticheskoi i prikladnoi plazmokhimii (3-7 sentyabrya 2014, g. Ples, Rossiya): sbornik trudov Ivan. Gos. Khim.-tekhno. un-t.* [In: VII International Symposium on Theoretical and Applied Plasma Chemistry (3-7 September 2014, Ples, Russia): Coll. of reports]. Ivanovo: 2014, pp. 205–206. (In Russ.).

Received December 11, 2015

УДК 669.187.25:669.15'74-194

## ВЫПЛАВКА ВЫСОКОМАРГАНЦОВИСТОЙ СТАЛИ В ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ. ВНЕПЕЧНАЯ ОБРАБОТКА. СООБЩЕНИЕ 2 <sup>\*,\*\*</sup>

**Вдовин К.Н.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Литейное производство  
и материаловедение» (kn.vdovin@gmail.com)

**Феокистов Н.А.<sup>1</sup>**, к.т.н., старший преподаватель кафедры «Литейное производство  
и материаловедение» (fna87@mail.ru)

**Сеницкий Е.В.<sup>1</sup>**, к.т.н., доцент кафедры «Литейное производство и материаловедение»

**Горленко Д.А.<sup>1</sup>**, ассистент кафедры «Литейное производство  
и материаловедение» (gorldima@yandex.ru)

**Дуров Н.А.<sup>2</sup>**, к.т.н., старший преподаватель кафедры «Экстракция и рециклинг черных металлов»

<sup>1</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова  
(455000, Россия, Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

**Аннотация.** Приведены результаты металлографических исследований марганцовистой стали до и после проведения внепечной обработки, а именно: обработки кальций-стронциевым карбонатом, продувки аргоном в ковше и при их совместном проведении. Представлены результаты количественного анализа неметаллических включений, а также изучено расположение неметаллических включений относительно границы зерен. При помощи электронного микроскопа подробно изучены состав и форма включений, образующихся в процессе проведения внепечной обработки и без нее. Описан механизм образования глобулярной формы включений в стали в процессе кристаллизации металла и при внепечной обработке. Рассмотрено влияние различных видов внепечной обработки на показатели ударной вязкости марганцовистой стали. Рассмотрен процесс легирования марганцовистой стали ванадием. Представлены практические данные по влиянию легирования ванадием марганцовистой стали на уровень ударной вязкости.

**Ключевые слова:** внепечная обработка, неметаллические включения, ударная вязкость, объемная доля, легирование ванадием, кальций-стронциевый карбонат, продувка аргоном.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-23-28

Раскисление марганцовистой стали в литейном цехе производят вторичным алюминием, остаточное содержание которого в основном находится в интервале от 0,04 до 0,07 %.

Из литературных источников установлено, что введение алюминия в сталь в качестве раскислителя может изменять форму, размер и состав комплексных оксидов. Кроме того, изменяя концентрацию кислорода в металле, алюминий способен оказывать влияние на морфологию сульфидов и их расположение [1 – 4].

Как известно, неметаллические включения в итоге оказывают влияние на механические свойства стали. Для того, чтобы нивелировать их негативное действие, проводят внепечную обработку марганцовистой стали в ковше. Внепечная обработка включает модифицирование кальцийсодержащими материалами, а также продувку инертным газом – аргоном.

Основной задачей проводимых исследований является совершенствование технологии внепечной обработки стали 110Г13Л с целью модифицирования и удаления неметаллических включений.

Для анализа неметаллических включений в марганцовистой стали были отобраны пробы металла от приливных проб отливок.

Первая группа образцов для исследований отобрана от плавок без внепечной обработки. Вторая группа – от плавок с обработкой кальций-стронциевым карбонатом (КСК) в ковше, а третья группа образцов – от плавок после продувки аргоном в ковше. Четвертая группа – после обработки КСК и продувки инертным газом в ковше.

Усредненные количественные характеристики обнаруженных включений представлены в таблице.

Анализируя данные, представленные в таблице, можно сделать вывод, что любой из видов внепечной обработки способствует снижению количества неметаллических включений в стали. Комплексная внепечная

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-10020).

\*\* В работе принимали участие Нефедьев А.А., Метелкин А.А.

**Количественные характеристики неметаллических включений**

**Quantitative characteristics of non-metallic inclusions**

Внепечная обработка	Объемная доля НВ, %	Число НВ, 1/мм <sup>2</sup>	Средняя площадь НВ, мкм <sup>2</sup>	Средняя длина НВ, мкм	Среднее расстояние между НВ, мкм
–	0,87	531	24,8	3,53	128
КСК, 1,5 кг/т	0,68	221	33	6,04	182
Продувка аргоном	0,55	205	16,4	3,88	202
КСК + продувка аргоном, 0,3 м <sup>3</sup> /т	0,45	186	12,3	1,32	221

обработка – модифицирование карбонатом совместно с продувкой инертным газом способствует снижению неметаллических включений почти в два раза.

В процессе обработки стали КСК происходит модифицирование неметаллических включений и их всплытие на зеркало металла в ковше за счет разности плотностей включений и самого металла. Следует отметить, что в результате реакции кальция с кислородом и серой происходит образование дополнительного количества неметаллических включений. В связи с этим, общее количество включений после обработки расплава карбонатом снижается незначительно.

В процессе продувки металла аргоном через донную пробку образуются пузырьки аргона, которые, поднимаясь вверх в объеме расплава, увлекают за собой неметаллические включения.

При комплексной обработке расплава в ковше происходит одновременное модифицирование включений с последующей флотацией их пузырьками аргона на зеркало металла.

Для более подробного изучения морфологии неметаллических включений проведен металлографический анализ на электронном микроскопе. Установлено, что часть включений располагается в межзеренных пространствах (рис. 1), выступает концентраторами напряжений и может привести к интеркристаллитному излому. Остальные включения располагаются внутри зерен (см. рис. 1), повышая вероятность транскристаллитного излома.

Из литературных источников [5, 6] установлено, что на механические свойства металла влияет не только количество неметаллических включений в стали, но и их морфология (состав, форма).

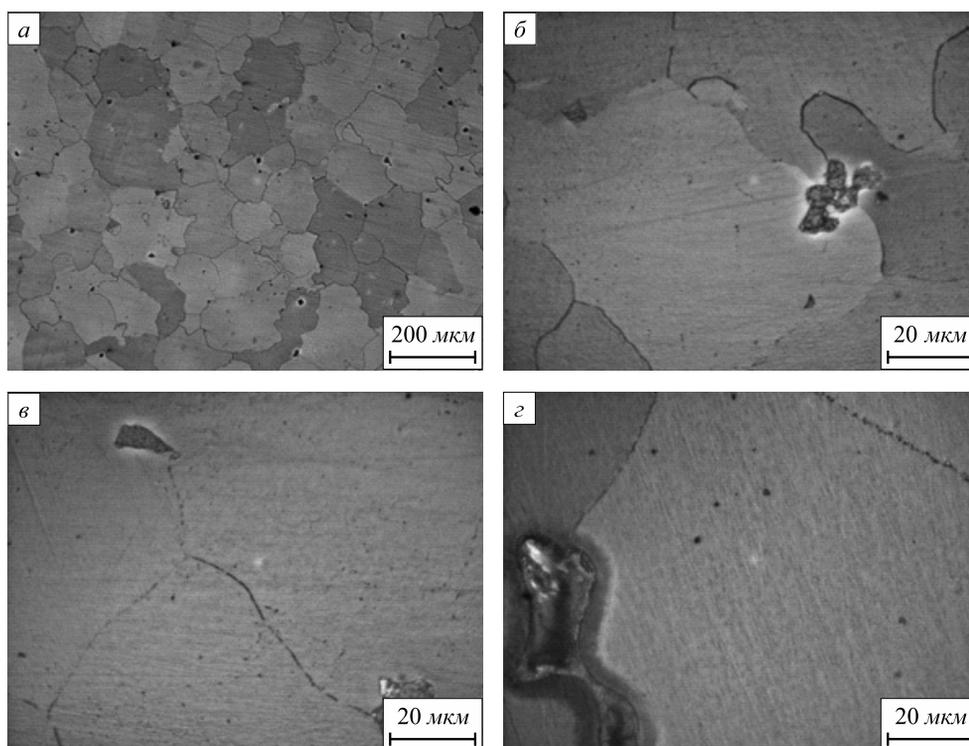


Рис. 1. Расположение неметаллических включений относительно зерен:  
а – ×100; б – г – ×1000

Fig. 1. Location of non-metallic inclusions relative to grains:  
а – ×100; б – г – ×1000

В образцах металла без проведения внепечной обработки наиболее часто встречаются включения прямоугольной (ромбической) формы (рис. 2). В основном это включения алюмосиликатов и силикатов железа. Размер таких включений довольно большой – 5 – 10 мкм.

Округлая форма включений является наиболее благоприятной с точки зрения концентрации напряжений в межзеренных и внутризеренных областях [6, 7]. Такую форму имеют комплексные включения силикатов железа и сульфиды марганца (рис. 2, б), что подтверждается данными, имеющимися в литературе [8, 9].

Правильная глобулярная форма говорит о том, что они находятся в жидком виде при температуре выплавки стали [10, 11]. Эти включения имеют разный механизм образования. В одном случае образуются легкоплавкие эвтектики, получающиеся в результате протекания химических реакций между включением и модификатором, поступившим в металл при внепечной обработке. В другом – включения выделяются из расплава в начальной стадии кристаллизации из-за низкой растворимости, например сульфиды, растворимость которых зависит от содержания свободного кислорода в металле.

После продувки металла аргоном наблюдается снижение количества неметаллических включений, а их форма и размер почти не изменяются.

Совершенно другая картина наблюдается при обработке металла в ковше КСК. В результате поступления в расплав кальция он, в первую очередь, взаимодействует с серой и кислородом с образованием оксисульфидов [12, 13]. Модифицирование оксидов будет возмож-

но в том случае, если поступающий в расплав кальций будет взаимодействовать с оксидом алюминия, образуя при этом жидкие неметаллические включения [14]. Для этого необходимо, чтобы концентрация серы в расплаве находилась в равновесном состоянии с образующимися включениями. По мнению авторов работы [7], содержание серы в металле должно быть не выше 0,015 – 0,020 %. Новая технология выплавки марганцовистой стали в литейном цехе позволяет получить существенно более низкую концентрацию серы в стали.

Для оценки воздействия неметаллических включений был проведен их анализ на сканирующем электронном микроскопе. Фотографии включений представлены на рис. 3.

Как видно, наиболее часто встречаются комплексные включения оксидов марганца и алюминия, оксисульфиды, корунд. Наличие последнего в чистом виде свидетельствует о недостаточном количестве вводимого кальция. Кроме того, встречаются включения алюминатов кальция округлой формы.

После обработки жидкого расплава марганцовистой стали КСК, а также продувки аргоном, происходит увеличение ударной вязкости металла на 5 – 17 %. На гистограмме, представленной на рис. 4, показаны средние величины ударной вязкости до и после проведения внепечной обработки марганцовистой стали.

Легирование стали 110Г13Л осуществлено в печи перед выпуском металла в ковш после проведения восстановительного периода.

Учитывая опыт производственных предприятий по производству отливок из марганцовистой стали, в

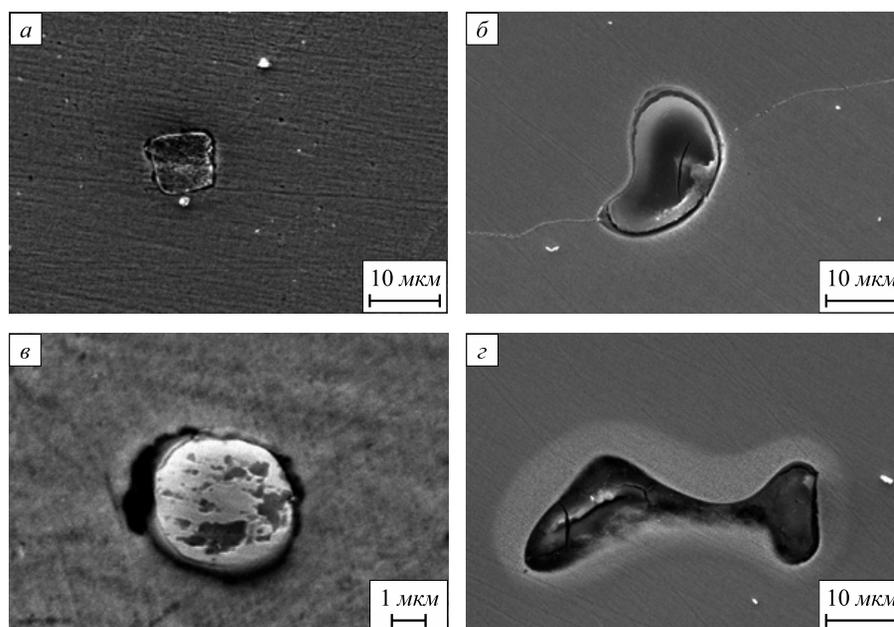


Рис. 2. Включения в стали марки 110Г13Л различной формы: а – ромбическая; б – округлая; в – глобулярная; з – сложная

Fig. 2. Inclusions of different forms in 110G13L steel: а – rhombic; б – round; в – globular; з – complex

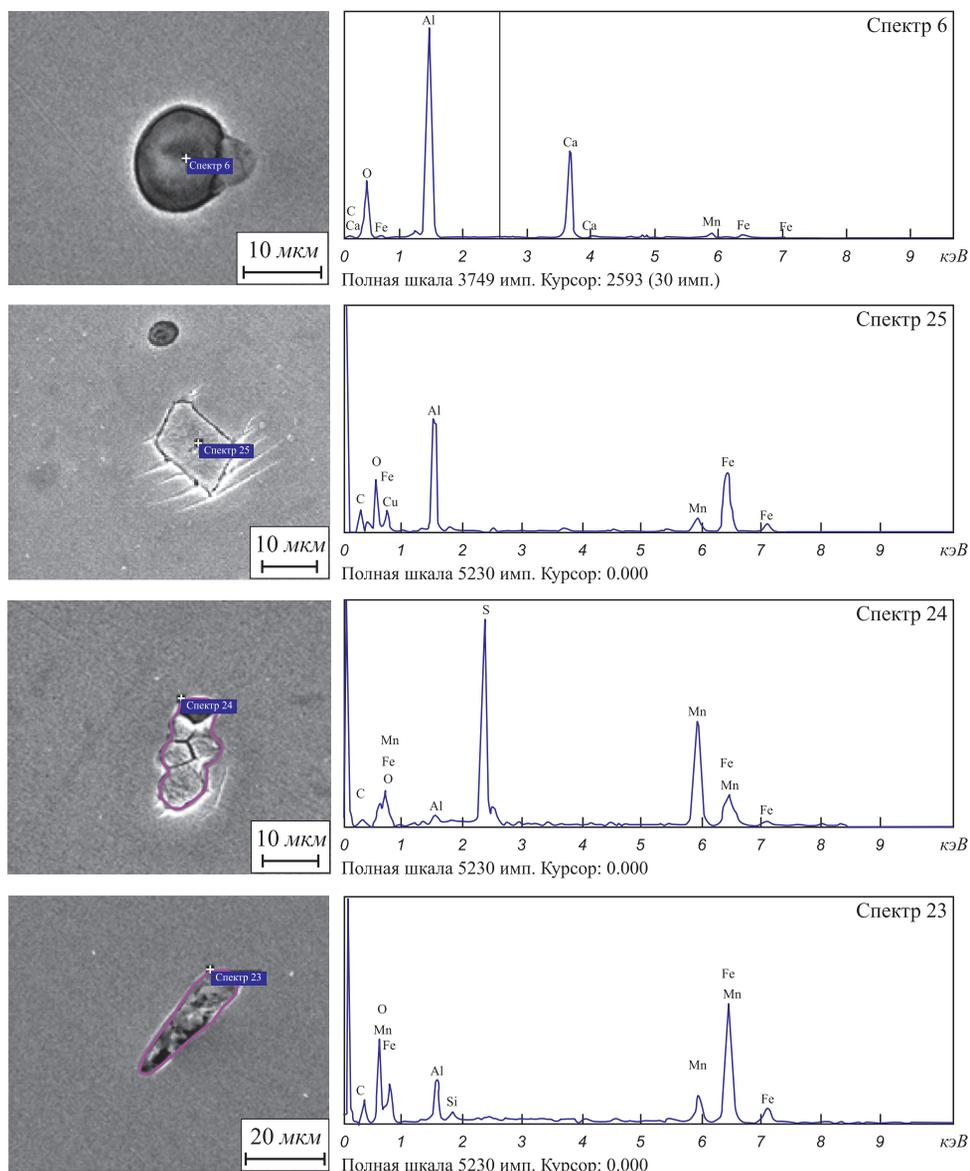


Рис. 3. Неметаллические включения в стали после обработки КСК в ковше:

*а* – комплексный оксид кальция и алюминия; *б* – оксид алюминия; *в* – комплексный оксисульфид; *г* – оксид марганца и алюминия

Fig. 3. Non-metallic inclusions in steel after CSC processing in the ladle:

*a* – complex oxide of calcium and aluminum; *b* – aluminum oxide; *c* – integrated oxysulfide; *d* – oxide of manganese and aluminum

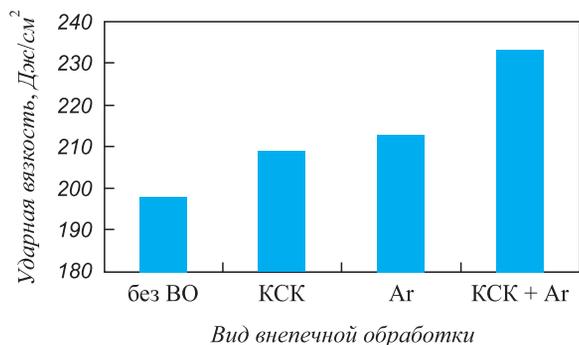


Рис. 4. Средние значения ударной вязкости стали марки 110Г13Л в зависимости от внепечной обработки

Fig. 4. Average values of impact toughness of 110G13L steel depending on the secondary treatment

качестве лигатур были выбраны азотированный феррохром и феррованадий.

Хром, введенный в сталь в качестве добавки, способен растворяться в аустените и образовывать карбиды. Ванадий образует карбиды типа VC. Комплексное действие ванадия и марганца заключается в том, что марганец понижает температуру области аустенизации, тем самым расширяя ее и увеличивая степень переохлаждения. Это создает условия для выделения большого количества карбидов ванадия [15].

Азот, растворяясь в аустените, способствует его упрочнению. Кроме того, наличие азота в металле приводит к образованию нитридов.

При легировании марганцовистой стали выбранными материалами получено содержание хрома в ее

составе в пределах 0,5 – 0,8 %, ванадия в интервале 0,1 – 0,2 %.

В процессе изучения микроструктуры образцов, отобранных от приливных проб полученных отливок, обнаружены карбиды ванадия и хрома.

Легирование хромом, ванадием и азотом способствовало повышению ударной вязкости марганцовистой стали в среднем до значения более 400 Дж/см<sup>2</sup>.

**Выводы.** Внепечная обработка, заключающаяся в обработке расплава кальций-стронциевым карбонатом, а также продувке аргоном, способствует снижению количества неметаллических включений на 50 % при использовании этих способов по отдельности, и на 65 % – совместно.

После обработки расплава кальций-стронциевым карбонатом происходит повышение ударной вязкости на 5,5 %; после продувке аргоном – на 7,6 %, а при комплексной обработке (КСК + продувка) ударная вязкость повышается на 17,7 %.

Легирование стали 110Г13Л азотированным феррохромом и ванадием способствует увеличению ударной вязкости на 76 %.

Требуются дополнительные исследования по определению рационального количества вводимых легирующих и модифицирующих добавок, а также по корректировке режимов термической обработки с учетом легирования и модифицирования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шульте Ю.А. Неметаллические включения в электростали. – М.: Metallurgia, 1964. – 207 с.
2. Явойский В.И., Рубенчик Ю.И., Оженко А.П. Неметаллические включения и свойства стали. – М.: Metallurgia, 1980. – 174 с.
3. Кудрин В.А. Metallurgia стали: Учебник для вузов. – 2-е изд. – М.: Metallurgia, 1989. – 560 с.
4. Ицкович Г.М. Раскисление стали и модифицирование неметаллических включений. – М.: Metallurgia, 1981. – 296 с.
5. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. Внепечная metallurgia стали. Т. 3. – М.: Теплотехник, 2010. – 544 с.
6. Голубцов В.А., Лунев В.В. Модифицирование стали для отливок и слитков. – Челябинск – Запорожье: ЗНТУ, 2009. – 356 с.
7. Моделирование современных процессов внепечной обработки и непрерывной разливки / О.Б. Исаев, Е.А. Чичкарев, В.В. Кислица и др. – М.: Metallurgizdat, 2008. – 373 с.
8. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А. Влияние обработки стали марки 25Л силикокальцием на неметаллические включения и механические свойства литой заготовки // Технология металлов. 2012. № 12. С. 21 – 26.
9. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А. Влияние серы, кальция алюминия на пластические свойства металла // Теория и технология metallургического производства: Межрегион. сб. науч. тр. / Под ред. В.М. Колокольцева. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2010. Вып. 10. С. 107 – 113.
10. Казаков А.А., Ковалев П.В., Рябошук С.В. Исследование термовременной природы неметаллических включений с целью повышения metallургического качества высокопрочных трубных сталей // Черные металлы. № 12. 2009. С. 5 – 11.
11. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А. Совершенствование технологии обработки литейной стали Са-содержащими материалами // Сталь. № 2. 2014. С. 24 – 29.
12. Модифицирование оксидных и сульфидных включений обработкой кальцием: Пер. с англ. // ОАО «Черметинформация». Новости черной metallurgии за рубежом. 2010. № 1. С. 33 – 35.
13. Моделирование обработки кальцием стали, раскисленной алюминием: Пер. с англ. // ОАО «Черметинформация». Новости черной metallurgии за рубежом. 2009. № 2. С. 40 – 42.
14. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. Т. 1. Процессы выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки. – М.: Теплотехник, 2008. – 528 с.
15. Филиппенков А.А. Ванадийсодержащие стали для отливок. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 350 с.

Поступила 5 октября 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. No. 1, pp. 23–28.

## HIGH-MANGANESE STEEL SMELTING IN ELECTRIC ARC FURNACE. LADLE TREATMENT. REPORT 2

**K.N. Vdovin**<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor; Head of the Chair “Materials Science and Foundry” (kn.vdovin@gmail.com)

**N.A. Feoktistov**<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair “Materials Science and Foundry” (fna87@mail.ru)

**E.V. Sinitskii**<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Materials Science and Foundry”

**D.A. Gorlenko**<sup>1</sup>, Assistant of the Chair “Materials Science and Foundry” (gorldima@yandex.ru)

**N.A. Durov**<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair “Extraction and Recycling of Ferrous Metals”

<sup>1</sup> Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov (38, Lenina ave., Magnitogorsk, 455000, Russia)

<sup>2</sup> National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS) (4, Leninskii ave., Moscow, 119049, Russia)

their joint conduct. The quantitative analysis of non-metallic inclusions was made and the location of non-metallic inclusions on grain boundaries was studied. With the help of electronic microscope the authors studied in detail the composition and shape of the inclusions formed at ladle treatment and without it. The mechanism of formation of globular inclusions in steel during solidification of the metal in ladle treatment is described. The effect of different types of ladle treatment on indicators of impact strength of manganese steel was considered, as well as the process of vanadium alloying of manganese steel. The paper presents practical data on the effect of vanadium alloying of manganese steel at a level of toughness.

**Keywords:** secondary processing, non-metallic inclusions, impact strength, volume fraction, vanadium alloying, calcium, strontium carbonate, argon blowing.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-1-23-28

#### REFERENCES

1. Shul'te Yu.A. *Nemetallicheskie vkhlyucheniya v elektrostali* [Non-metallic inclusions in electric steel]. Moscow: Metallurgiya, 1964, 207 p. (In Russ.).

2. Yavoiskii V.I., Rubenchik Yu.I., Okenko A.P. *Nemetallicheskie vkhlyucheniya i svoystva stali* [Non-metallic inclusions and properties of steel]. Moscow: Metallurgiya, 1980, 174 p. (In Russ.).
3. Kudrin V.A. *Metallurgiya stali: uchebnik dlya vuzov* [Metallurgy of steel: Textbook for universities]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 560 p. (In Russ.).
4. Itskovich G.M. *Raskislenie stali i modifitsirovanie nemetallicheskih vkhlyuchenii* [Deoxidation of steel and modification of non-metallic inclusions]. Moscow: Metallurgiya, 1981, 296 p. (In Russ.).
5. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V. *Proizvodstvo stali. T. 3. Vnepechnaya metallurgiya stali* [Production of steel. Vol. 3 Secondary treatment of steel]. Moscow: Teplotekhnika, 2010, 544 p. (In Russ.).
6. Golubtsov V.A., Lunev V.V. *Modifitsirovanie stali dlya otlivok i slitkov* [Modification of steel for castings and ingots]. Chelyabinsk – Zaporizhia: ZNTU, 2009, 356 p. (In Russ.).
7. Isaev O.B., Chichkarev E.A., Kislitsa V.V. etc. *Modelirovanie sovremennykh protsessov vnepechnoi obrabotki i nepreryvnoi razlivki* [Modeling of modern processes of secondary treatment and continuous casting]. Moscow: Metallurgizdat, 2008, 373 p. (In Russ.).
8. Vdovin K.N., Feoktistov N.A. Influence of processing of 25L steel by silicocalcium on non-metallic inclusions and mechanical properties of cast billets. *Tekhnologiya metallov*, 2012, no. 12, pp. 21–26. (In Russ.).
9. Vdovin K.N., Feoktistov N.A. Effect of sulfur, calcium, aluminum on plastic properties of metal. In: *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva: mezhhregion. sb. nauch. tr.* [Theory and technology of metallurgical production: Interregional coll. of sci. papers]. Kolokol'tsev V.M. ed. Magnitogorsk: GOU VPO «MGU», 2010, Issue 10, pp. 107–113. (In Russ.).
10. Kazakov A.A., Kovalev P.V., Ryaboshuk S.V. Investigation of thermo-temporary nature of non-metallic inclusions to improve the metallurgical quality of high-strength pipe steels. *Chernye metally*. 2009, no. 12, pp. 5–11. (In Russ.).
11. Vdovin K.N., Feoktistov N.A. Improving the processing technology of casting steel by Ca-containing materials. *Stal'*, 2014, no. 2, pp. 24–29. (In Russ.).
12. Modification of oxide and sulfide inclusions by treatment with calcium. *OAO Chermetinformatsiya. Novosti chernoii metallurgii za rubezhom*, 2010, no. 1, pp. 33–35. (In Russ.).
13. Modeling of processing of aluminum deoxidized steel by calcium. Trans. from Eng. *OAO Chermetinformatsiya. Novosti chernoii metallurgii za rubezhem*, no. 2, 2009, pp. 40–42. (In Russ.).
14. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V. *Proizvodstvo stali. T. 1. Protsessy vyplavki, vnepechnoi obrabotki i nepreryvnoi razlivki* [Production of steel. Vol. 1. Smelting processes, out-of-furnace treatment and continuous casting]. Moscow: Teplotekhnika, 2008, 528 p. (In Russ.).
15. Filippenkov A.A. *Vanadiisoderzhashchie stali dlya otlivok* [Vanadium steel for castings]. Ekaterinburg.: UrO RAN, 2001, 350 p. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The research was financially supported by the grant of the Russian Scientific Foundation (project no. 15-19-10020).

The work was performed with the participation of A.A. Nefed'ev and A.A. Metelkin.

Received October 05, 2015

УДК 621.31

## УПРАВЛЕНИЕ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ШАГА ДЛЯ ВАКУУМНОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ

*Ливаткин П.А., мастер по ремонту цеха КИПиА, аспирант Института  
проблем управления им. В.А. Трапезникова (PAL2010@yandex.ru)  
Положенцев К.А., старший мастер по ремонту цеха КИПиА,  
аспирант СТИ НИТУ «МИСиС» (kirill.polozhentsev@gmail.com)*

**ОАО «Металлургический завод «Электросталь»**  
(144002, Россия, Электросталь, Московская обл., ул. Железнодорожная, 1)

**Аннотация.** Настоящая статья описывает способ управления вакуумной дуговой печью с помощью программного шага. В работах [1, 2] рассмотрена модель управления напряжением вакуумной дуговой печи, однако алгоритм управления накапливает большую статическую ошибку. С целью ее снижения использован программный шаг, который представляет собой заранее рассчитанное движение расходуемого электрода с поддержанием постоянной скорости переплава и величины межэлектродного промежутка в заданных границах. Управление с помощью программного шага позволяет вслепую, без обратных связей, производить переплав в вакуумной дуговой печи для идеальных электродов. Ситуация меняется для неидеального (реального) электрода и «слепое» управление с помощью только программного шага не способно поддерживать нужные параметры переплава. Поэтому при переплаве неидеального электрода нужно пользоваться обратной связью по напряжению. Проведено моделирование для идеального и неидеального расходуемого электродов в среде Matlab.

**Ключевые слова:** вакуумная дуговая печь, идеальный электрод, скорость переплава, межэлектродное расстояние, программный шаг, неидеальный электрод, напряжение печи, обратная связь по напряжению, статическая ошибка.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-29-34

Вакуумная дуговая печь (ВДП) представляет собой сложный математический объект. Управление ВДП строится на поддержании следующих параметров: напряжение печи, ток печи, межэлектродный промежуток и т. д.

В качестве объекта исследования выбрана ВДП ДВС-3.2-Г1 с расходуемым электродом [1, 2].

Уравнение межэлектродного промежутка описывается следующим образом [1]:

$$l(t) = S_0 + S(t) - \frac{m_{\text{сл}}(t)}{\rho r} \left( \frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right), \quad (1)$$

где  $S_0$  – расстояние от электрода до дна кристаллизатора на момент начала переплава, м;  $S(t)$  – перемещение электрода с момента начала переплава, м;  $R$  – радиус слитка, м;  $r_3$  – радиус электрода (если электрод не цилиндрический, то  $r_3$  является функцией длины электрода  $l_3(t)$ ), м;  $\rho$  – плотность электрода, кг/м<sup>3</sup>;  $m_{\text{сл}}(t)$  – масса слитка в текущий момент времени, кг.

Перемещение штока-электрододержателя с электродом запишем следующим выражением [1]:

$$\dot{S} = K_p \omega, \quad (2)$$

где  $K_p$  – коэффициент передачи редуктора, м;  $\omega(t)$  – скорость вращения вала двигателя, рад/с.

Перемещение расходуемого электрода происходит с помощью цепи и противовеса, которые приводит в движение двигатель постоянного тока. Запишем уравнения двигателя постоянного тока [1, 2]:

$$L_{\text{я}} \dot{i}_{\text{я}} + r_{\text{я}} i_{\text{я}} = u_{\text{я}} - e_{\text{я}}; \quad (3)$$

$$e_{\text{я}} = k_e \omega; \quad (4)$$

$$u_{\text{я}} = L_{\text{я}} \dot{i}_{\text{я}} + r_{\text{я}} i_{\text{я}} + k_e \omega; \quad (5)$$

$$J \dot{\omega} = M + M_{\text{н}}, \quad (6)$$

где  $e_{\text{я}}$  – противоэдс, создаваемое в якоре при вращении, В;  $J$  – приведенный к валу двигателя момент инерции механической системы (электрода, штока и груза), кг·м<sup>2</sup>;  $M$  – момент, создаваемый на валу двигателя, кг·м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;  $k_e$  – конструктивная постоянная двигателя, В·с;  $i_{\text{я}}$  – ток якоря двигателя, А;  $r_{\text{я}}$  – сопротивление якоря двигателя, Ом;  $L_{\text{я}}$  – индуктивность якоря, Гн;  $u_{\text{я}}$  – напряжение якоря двигателя, В;  $M_{\text{н}}$  – момент нагрузки, кг·м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>.

Для формирования напряжения якорной цепи запишем следующие выражения [3]:

$$T_{\text{ф}} \dot{u}_{\text{ф}} + u_{\text{ф}} = K_{\text{рег}} \varepsilon; \quad (7)$$

$$\varepsilon = u_3 - u_{\text{п}}, \quad (8)$$

где  $u_3$  – заданное напряжение дуговой печи, В;  $K_{\text{рег}}$  – коэффициент регулятора;  $u_{\text{п}}$  – напряжение печи, В;  $u_{\text{ф}}$  – сглаженное значение напряжения, В;  $\varepsilon$  – разность между заданным и текущим напряжением, В;  $T_{\text{ф}}$  – постоянная времени сглаживающего фильтра, с.

Проведя анализ работы ВДП [1, 2, 4, 5], был выявлен следующий недостаток: текущий регулятор накапливает статическую ошибку достаточно большой величины и не позволяет поддерживать межэлектродный промежуток на желаемом значении. График поддержания межэлектродного промежутка приведен на рис. 1.

Статическую ошибку может компенсировать ПИ-регулятор, но использование его или П-регулятора не позволяет поддерживать межэлектродный промежуток на желаемом уровне.

Поддерживать желаемый межэлектродный промежуток можно с помощью программного шага [3, 6 – 9]. Программный шаг – это этап программного управления, предназначенный для переплава одного участка аппроксимации расходоуемого электрода. Программный шаг позволяет скомпенсировать разницу между расхо-

дуемым электродом и наплавляемым слитком при условии неизменности межэлектродного промежутка в процессе переплава.

Программный шаг строится, исходя из формы одного участка аппроксимации, предполагаемой скорости переплава, геометрии печи и параметров механической передачи, но без учета обратных связей.

С другой стороны программный шаг – это задание нужного напряжения на двигатель на каждом участке аппроксимируемого электрода, чтобы скомпенсировать изменение напряжения печи и оставить межэлектродный промежуток неизменным или с минимальным изменением.

Структурная схема программного шага приведена на рис. 2.

Значение напряжения программного шага  $U_{\text{прог}}(t)$  поступает на регулятор положения штока (РЕГ). Он выдает задающее напряжение  $U_{\text{зпрог}}(t)$ . Напряжение якоря  $U_{\text{япрог}}(t)$  поступает с выпрямителя (В) на питание двигателя постоянного тока (ДПТ), на который действует меняющийся момент нагрузки  $M_{\text{н}}(t)$ . Вращение вала ДПТ передает скорость перемещения  $v_{\text{неп}}(t)$  штока (Ш). Изменение положения штока изменяет сопротивление электрической дуги, а, следовательно, напряжение печи  $U_{\text{п}}(t)$ .

Программный шаг для идеального электрода в форме цилиндра будет иметь следующий вид.

Скорость переплава электрода  $v_{\text{неп}}$  опишем в виде уравнения

$$v_{\text{неп}} = \dot{m}_{\text{сл}}(t). \quad (9)$$

Расстояние от электрода до слитка будем считать  $l$ , полагая  $r_3$  константой:

$$l = S_0 + S(t) - \frac{m_{\text{сл}}(t)}{\pi r} \left( \frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right), \quad r_3 = \text{const}. \quad (10)$$

Из уравнения (10) найдем путь, пройденный электродом  $S$ :

$$S(t) = l - S_0 + \frac{m_{\text{сл}}(t)}{\pi r} \left( \frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right). \quad (11)$$

Тогда  $\dot{S}$  будет иметь следующий вид:

$$\dot{S} = \frac{v_{\text{неп}}}{\pi r} \left( \frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right). \quad (12)$$

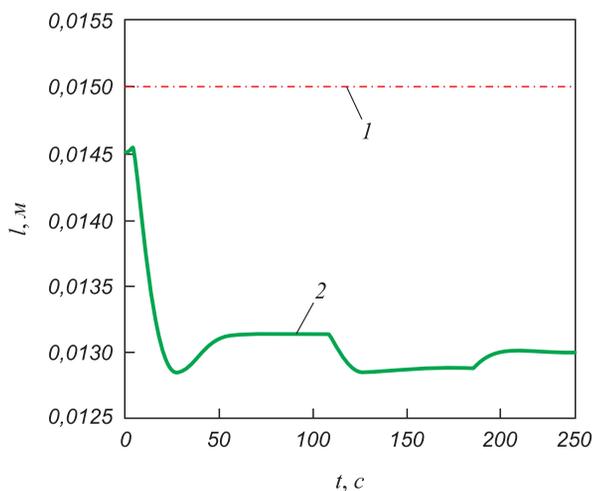


Рис. 1. График межэлектродного промежутка.

Здесь и далее к рис. 3, 4, 6, 8:

желаемое (1) и действительное (2) значения межэлектродного промежутка

Fig. 1. Plot of the electrode gap.

Hereinafter, in Fig. 3, 4, 6, 8: desired (1) and valid (2) value of the electrode gap

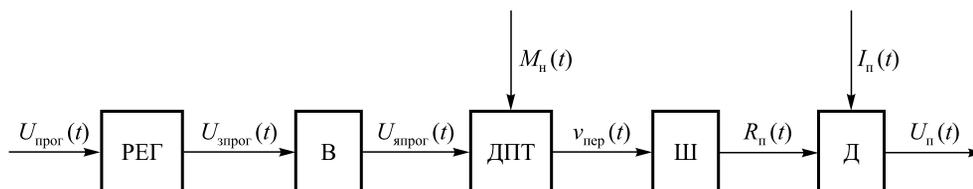


Рис. 2. Структурная схема программного шага

Fig. 2. Block diagram of the program step

Запишем в левую часть выражения (2) правую часть выражения (1) и выразим скорость вращения  $\omega(t)$ :

$$\omega(t) = \frac{v_{\text{пер}}}{K_p \pi \rho} \left( \frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right). \quad (13)$$

В установившемся режиме производные будут равны нулю, тогда уравнения (3) – (6) примут вид:

$$0 = k_m i_{\text{я}} + M_{\text{н}}; \quad (14)$$

$$r_{\text{я}} i_{\text{я}} + k_e \omega = u_{\text{я}}. \quad (15)$$

Выразим  $i_{\text{я}}$  из равенства (14):

$$i_{\text{япрог}} = -\frac{M_{\text{н}}}{k_m}, \quad (16)$$

где  $i_{\text{япрог}}$  – ток якоря двигателя при программном шаге, А.

Подставим в равенство (15) скорость вращения из (13) и ток якоря программного шага из (16) и получим:

$$u_{\text{я}} = -\frac{r_{\text{я}} M_{\text{н}}}{k_m} + \frac{k_e v_{\text{пер}}}{K_p \pi \rho} \left( \frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right). \quad (17)$$

С другой стороны напряжение, подаваемое на обмотки якоря выпрямителем в установившемся режиме, равно

$$u_{\text{я}} = k_{\text{в}} u_{\text{ф}}, \quad (18)$$

где  $u_{\text{ф}}$  – фильтрованный сигнал задания напряжения с контроллера на выпрямитель двигателя постоянного тока, В.

Фильтрованный сигнал задания напряжения (7) в установившемся режиме будет иметь следующий вид:

$$u_{\text{ф}} = K_{\text{пер}} \varepsilon. \quad (19)$$

Выразим величину ошибки  $\varepsilon$  из (19) и (18):

$$\varepsilon = \frac{u_{\text{ф}}}{K_{\text{пер}}} = \frac{u_{\text{я}}}{K_{\text{пер}} k_{\text{в}}}. \quad (20)$$

Напряжение печи программного шага найдем из выражения (8) с учетом (17) и (20) и запишем в следующем виде:

$$u_{\text{ппрог}} = u_3 - \varepsilon = u_3 - \left( -\frac{\frac{r_{\text{я}} M_{\text{н}}}{k_m} + \frac{k_e v_{\text{пер}}}{K_p \pi \rho} \left( \frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right)}{K_{\text{пер}} k_{\text{в}}} \right), \quad (21)$$

где  $u_{\text{ппрог}}$  – напряжение печи согласно программному шагу, В.

Межэлектродный промежуток опишем следующим уравнением:

$$l(t) = l_0 + L_{\text{пн}} - L(t) - L_{\text{сл}}(t) + l_{\text{прим}}(t) + S(t), \quad (22)$$

где  $l_0$  – длина межэлектродного промежутка в момент времени  $t_0$ , м;  $L_{\text{пн}} - L(t)$  – длина сплавившегося электрода от  $t_0$  до текущего времени, м;  $L(t)$  – длина электрода в текущий момент времени, м;  $L_{\text{сл}}(t)$  – высота слитка в текущий момент времени, м;  $l_{\text{прим}}(t)$  – длина, увеличивающая промежуток при испарении примесей, м;  $S(t)$  – путь, пройденный штоком от  $t_0$  до текущего момента времени, м.

Используя программный шаг в установившемся режиме, путь штока  $S(t)$  должен компенсировать изменение длины электрода и слитка [10]:

$$L_{\text{пн}} - L(t) - L_{\text{сл}}(t) + l_{\text{прим}}(t) + S(t) = 0. \quad (23)$$

В установившемся режиме межэлектродный промежуток будет равен

$$l(t) = l_0, \quad (24)$$

а значит  $u_3 = u_{\text{п}}$ .

Рассчитаем программный проход для идеального электрода в форме усеченного конуса [4, 10 – 12].

Запишем выражение (10) в следующем виде:

$$l = S_0 + S(t) + (l_x - h_{\text{сл}}), \quad (25)$$

где  $h_{\text{сл}}$  – высота слитка, м.

Длину расплавленной части электрода  $l_x$  для установившегося режима найдем из выражения

$$\frac{\Delta R^2}{l_3^2} l_x^3 + 3 \frac{R_2 \Delta R}{l_3} l_x^2 + 3 R_2^2 l_x - \frac{3}{\pi} v_{\text{пер}} \frac{t_{\text{пл}}}{\rho} = 0. \quad (26)$$

Высота слитка находится из уравнения

$$h_{\text{сл}} = \frac{v_{\text{пер}} t_{\text{пл}}}{R^2 \pi}. \quad (27)$$

Следовательно, для электрода конической формы

$$l(t) = S_0 + S(t) + (l_x(t) - h_{\text{сл}}(t)). \quad (28)$$

Решая уравнение (28), находим межэлектродный промежуток согласно программному шагу [13 – 15].

График поддержания межэлектродного промежутка с помощью программного шага для цилиндрического электрода приведен на рис. 3. График межэлектродного промежутка поддерживается равным 0,01525 м при желаемом промежутке  $0,015 \pm 0,00075$  м.

График поддержания межэлектродного промежутка с помощью программного шага для электрода формы усеченного конуса приведен на рис. 4, из которого видно, что длина межэлектродного промежутка поддержи-

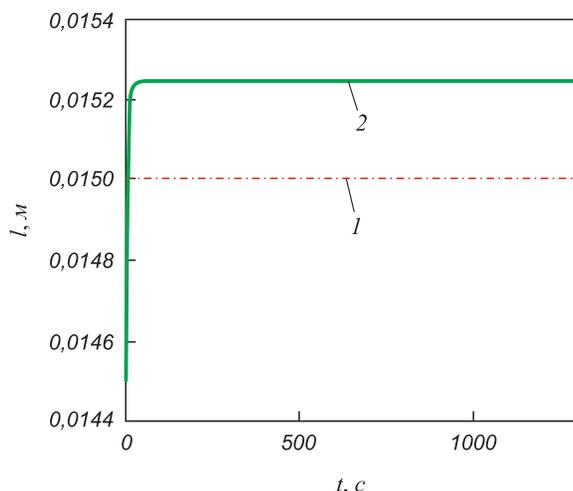


Рис. 3. График межэлектродного промежутка (программный шаг, цилиндрический электрод)

Fig. 3. Plot of the electrode gap (program step, a cylindrical electrode)

вается в заданных пределах 0,0158 мм при управлении по программному шагу.

Рассмотрим программный шаг для неидеального (реального) электрода:

$$S(t) = \frac{v_{\text{пер}}(t)}{\pi} \left( \frac{1}{\rho_1 R^2} - \frac{1}{\rho_2 r_3^2} \right) t + l_{\text{прим}}(t), \quad (29)$$

где  $\rho_1$  – плотность слитка, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_2$  – плотность электрода, кг/м<sup>3</sup>.

Действительная скорость переплава

$$v_{\text{пер}}(t) = v^* + \Delta v(t), \quad (30)$$

где  $v^*$  – заданная скорость переплава электрода, которую задают технологи, кг/мин;  $\Delta v(t)$  – неизвестное отклонение скорости переплава, которое будем уточнять, кг/мин.

Полагаем:

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho. \quad (31)$$

Пренебрегаем  $l_{\text{прим}}(t)$ :

$$S(t) = \frac{v_{\text{пер}}(t)}{\pi \rho} \left( \frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right) t. \quad (32)$$

Подставим уравнение (30) в (32):

$$S(t) = \frac{v^*}{\pi \rho} \left( \frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right) t + \frac{\Delta v(t)}{\pi \rho} \left( \frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right) t. \quad (33)$$

Представим:

$$S^*(t) = \frac{v^*}{\pi \rho} \left( \frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right) t; \quad (34)$$

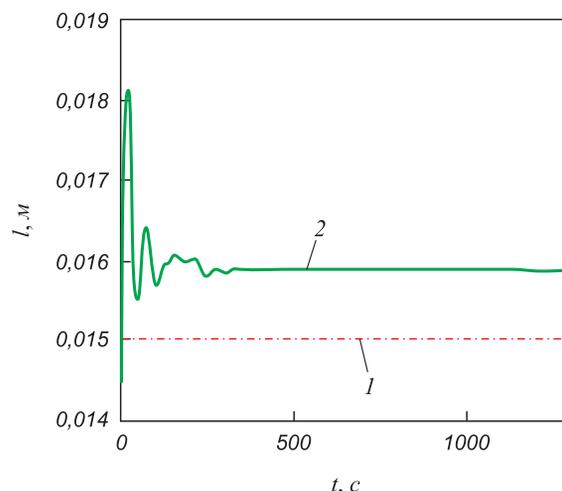


Рис. 4. График межэлектродного промежутка (программный шаг, электрод в форме усеченного конуса)

Fig. 4. Plot of the electrode gap (program step, an electrode in the form of a truncated cone)

$$\Delta S(t) = \frac{\Delta v(t)}{\pi \rho} \left( \frac{1}{R^2} - \frac{1}{r_3^2} \right) t. \quad (35)$$

Получаем:

$$S(t) = S^*(t) + \Delta S(t), \quad (36)$$

где  $S^*(t)$  – рассчитанное значение положения электрода, м;  $\Delta S(t)$  – изменение положения электрода, зависящее от неизвестного отклонения скорости переплава  $\Delta v(t)$ , м.

Текущий радиус неидеального электрода находится путем аппроксимации электрода на сумму цилиндров, из которых состоит электрод.

График желаемого и действительного напряжения печи по программному шагу с экспериментальными данными приведен на рис. 5.

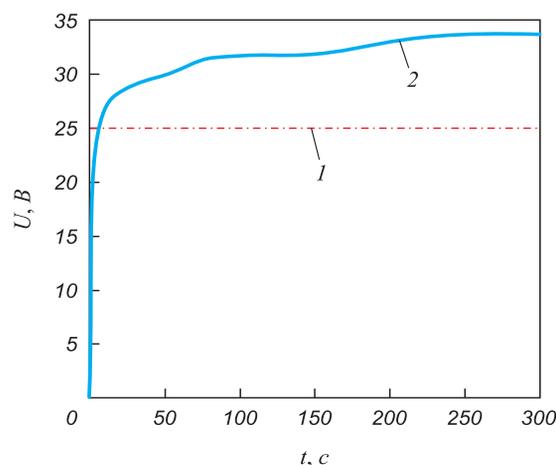


Рис. 5. График желаемого (1) и действительного (2) напряжения печи (реальный электрод)

Fig. 5. Plot of the desired (1) and actual (2) voltage furnace (real electrode)

График поддержания межэлектродного промежутка по программному шагу с экспериментальными данными приведен на рис. 6.

Из рис. 5, 6 видно, что управление по программному шагу без обратных связей на реальном электроде не справляется с поставленными задачами в поддержании напряжения печи и межэлектродного промежутка.

При добавлении к программному шагу обратной связи по напряжению (двухкомпонентное управление) получаем следующие графики:

- текущего и желаемого напряжения ВДП с программным шагом и обратной связью по напряжению (рис. 7);
- длины межэлектродного промежутка исследуемой ВДП с программным шагом и обратной связью по напряжению (рис. 8).

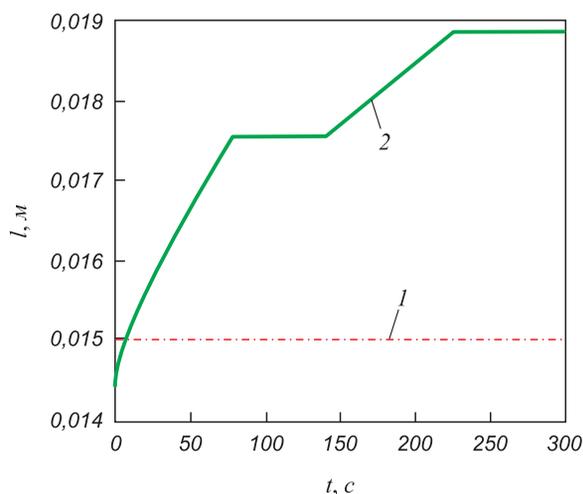


Рис. 6. График межэлектродного промежутка (реальный электрод)

Fig. 6. Plot of the electrode gap (real electrode)

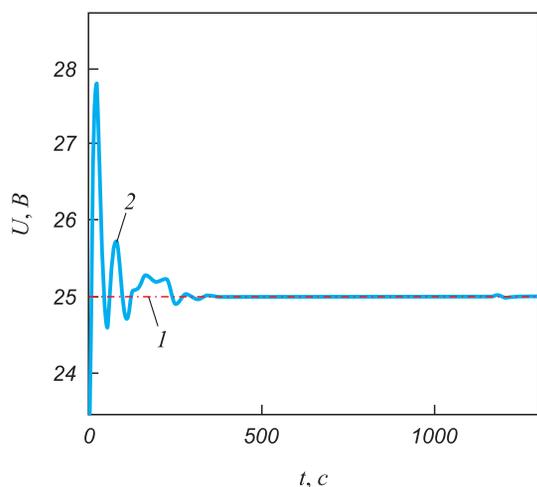


Рис. 7. График желаемого (1) и действительного (2) напряжения печи для реального электрода (программный шаг и обратная связь по напряжению)

Fig. 7. Plot of the desired (1) and actual (2) voltage of the furnace for the real electrode (program step and voltage feedback)

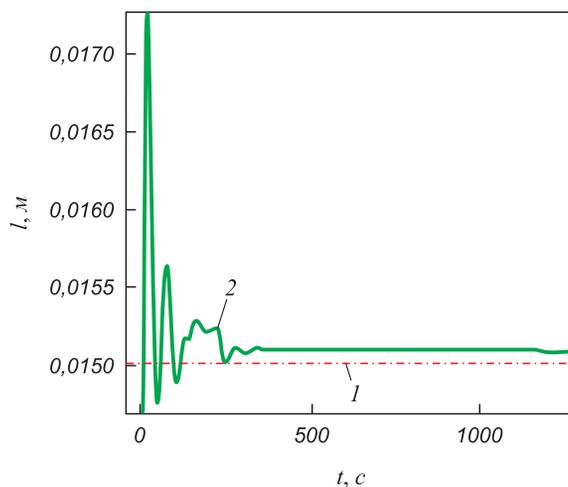


Рис. 8. График межэлектродного промежутка для реального электрода (программный шаг и обратная связь по напряжению)

Fig. 8. Plot of the electrode gap for the real electrode (program step and voltage feedback)

Программный шаг и обратная связь по напряжению устанавливают длину межэлектродного промежутка для электрода произвольной формы примерно равной 0,01515 м в соответствии с рис. 8, что удовлетворяет заданной длине межэлектродного промежутка  $0,015 \pm 0,00075$  м. Напряжение печи становится равным 25 В.

Использование программного шага с обратной связью по напряжению (двухкомпонентное управление) позволяет добиться минимальных отклонений в напряжении печи и в длине межэлектродного промежутка.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Положенцев К.А., Ливаткин П.А., Александров А.Г. Построение модели процесса управления напряжением вакуумной дуговой печи. Сообщение 1 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 3. С. 203 – 206.
2. Положенцев К.А., Ливаткин П.А., Александров А.Г. Построение модели процесса управления напряжением вакуумной дуговой печи. Сообщение 2 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 6. С. 444 – 447.
3. Михайлов О.П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. – М.: Машиностроение, 1990. – 304 с.
4. Щербань И.В., Иванов С.В. Методика синтеза кусочно-программного управления маневром уклонения с учетом терминальных ограничений // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2009. № 5. С. 30 – 33.
5. Угрюмов С.А., Боровский А.Б. Реализация программного управления на базе персонального компьютера // Изв. Южного федерального университета. Технические науки. 2005. Т. 45. № 1. С. 146 – 148.
6. Сидорчик Е.В. Повышение производительности работы станков с числовым программным управлением и точности обработки деталей // Интернет-журнал Науковедение. 2013. № 4(17). С. 1 – 5.
7. Matthieu Revil-Baudard, Alain Jardy, Hervé Combeau etc. Solidification of a vacuum arc-remelted zirconium ingot // Metallurgical and Materials Transactions B. 2014. Vol. 45. Issue 1. С. 51 – 57.

8. Pierre L. Fauchais, Joachim V. R. Heberlein, Maher I. Boulos. Process Integration // *Thermal Spray Fundamentals*. Springer. 2013. С. 1351 – 1400.
9. Boronenkov V., Zinigrad M., Leontiev L. etc. Modeling and simulation of welding surfacing and coating processes // *Engineering materials*. Vol. 18. Phase Interaction in the metal – oxide melts – gas – system. 2011. P. 265 – 322.
10. Махитко В.П., Сироткина И.Б. Адаптация в интегрированные информационно-коммуникационные системы технологического оборудования с числовым программным управлением // *Изв. Самарского научного центра РАН*. 2010. № 4 – 2. Т. 12. С. 411 – 418.
11. Сосуров Г.О., Чернышов Е.А. Оптимизация режимов выдержки слитков из жаропрочных сплавов в вакуумно-дуговой печи на базе предприятия ОАО «РУСПОЛИМЕТ» // *Успехи современного естествознания*. 2012. № 6. С. 54.
12. Zhi-jun Yang, Hong-chao Kou, Xiao-hua Zhao etc. Effect of remelting current on molten pool profile of titanium alloy ingot during vacuum arc remelting process // *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*. 2011. Vol. 16. Issue 2. С. 133 – 136.
13. Белинская Ю.С., Четвериков В.Н., Ткачев С.Б. Автоматический синтез программного движения вертолета вдоль горизонтальной прямой // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2013. № 10. С. 285 – 298.
14. Нагучев Д.Ш., Сахаров В.Л., Старченко И.Б. Программное управление параметрическим гидролокатором // *Изв. Южного федерального университета. Технические науки*. 2013. № 6(143). С. 127 – 132.
15. Кабулова Е.Г. Анализ процессов моделирования и принятия решений в системах металлургического производства // *Естественные и технические науки*. 2015. № 4(82). С. 192 – 194.

Поступила 7 мая 2015 г.

IZVESTIYA VUZov. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. No. 1, pp. 29–34.

## OPERATION WITH PROGRAM STEP FOR VACUUM ARC FURNACE

**P.A. Livatkin**, Master of Shop Repairing, Postgraduate of V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences  
(PAL2010@yandex.ru)

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

JSC “Metallurgical Plant “Electrostral” (1 Zheleznodorozhnaya str., Elektrostral, Moscow Region, 144002, Russia)

**Abstract.** The article describes the method of control of VAR furnace by program step. The papers [1, 2] describe the model of voltage control for VAR furnace. However, furnace controller generates huge static error, and using program step can solve this problem. The program step calculates movement of consumable electrode with constant melt rate and electrode gap in right parameters. The control with program step helps to remelt ideal consumable electrodes without feedbacks in VAR furnace. Situation changes when we try to remelt a nonideal consumable electrode using only program step because it is very difficult to get right parameters. This problem can be solved by using the voltage feedback with program step. The authors have got the models of ideal and nonideal consumable electrodes in conditions of Matlab.

**Keywords:** vacuum arc furnace, ideal consumable electrode, remelting speed, electrode gap, program step, nonideal consumable electrode, furnace voltage, feedback voltage, static error.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-29-34

### REFERENCES

1. Polozhentsev K.A., Livatkin P.A., Aleksandrov A.G. Creating a model of voltage control in vacuum arc furnace. Report 1. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 3, pp. 203–206. (In Russ.).
2. Polozhentsev K.A., Livatkin P.A., Aleksandrov A.G. Creating a model of voltage control in vacuum arc furnace. Report 2. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 6, pp. 444–447. (In Russ.).
3. Mikhailov O.P. *Avtomatizirovanniy elektroprivod stankov i promyshlennykh robotov* [Automated electric drive of machines and industrial robots]. Moscow: Mashinostroenie, 1990, 304 p. (In Russ.).
4. Shcherban' I.V., Ivanov S.V. Methods of synthesis of piecewise program management of evasive action, taking into account the terminal limitations. *T-Comm – Telekommunikatsii i Transport*. 2009, no. 5, pp. 30–33. (In Russ.).
5. Ugryumov S.A., Borovskii A.B. Implementation of the software-based control of a personal computer. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2005, no. 1, vol. 45, pp. 146–148. (In Russ.).
6. Sidorchik E.V. Increasing the productivity of machine tools with CNC and accuracy of parts machining. *Internet-zhurnal Naukovedenie*. 2013, no. 4 (17), pp. 1–5. (In Russ.).
7. Matthieu Revil-Baudard, Alain Jardy, Hervé Combeau, Faustine Leclerc, Véronique Rebeyrolle Solidification of a Vacuum Arc-Remelted Zirconium Ingot. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2014, vol. 45, Issue 1, pp. 51–57.
8. Pierre L. Fauchais, Joachim V. R. Heberlein, Maher I. Boulos Process Integration. *Thermal Spray Fundamentals*. Springer. 2013, pp. 1351–1400.
9. Vladislav Boronenkov, Michael Zinigrad, Leopold Leontiev, Edward Pastukhov, Mikhail Shalimov, Sergey Shanchurov. Modeling and Simulation of Welding, Surfacing and Coating Processes. *Engineering Materials, vol. 18. Phase Interaction in the Metal – Oxide Melts – Gas – System*. 2011, vol. 18 of the, pp. 265–322.
10. Makhit'ko V.P., Sirotkina I.B. Adapting to integrated information and communication systems of manufacturing equipment with CNC. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2010, no. 4-2, vol. 12, pp. 411–418. (In Russ.).
11. Sosurov G.O., Chernyshov E.A. Optimization of exposure ingots of high-temperature alloys in vacuum arc furnace of “Ruspolimet”. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2012, no. 6, p. 54. (In Russ.).
12. Zhi-jun Yang, Hong-chao Kou, Xiao-hua Zhao, Jin-shan Li, Rui Hu, Hui Chang, Lian Zhou Effect of remelting current on molten pool profile of titanium alloy ingot during vacuum arc remelting process. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*. 2011, vol. 16, Issue 2, pp. 133–136.
13. Belinskaya Yu.S., Chetverikov V.N., Tkachev S.B. Automatic synthesis of programmed motion of the helicopter along the horizontal line. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman*. 2013, no. 10, pp. 285–298. (In Russ.).
14. Naguchev D.Sh., Sakharov V.L., Starchenko I.B. Program management of parametric sonar. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2013, no. 6 (143), pp. 127–132. (In Russ.).
15. Kabulova E.G. Analysis of the processes of modeling and decision-making systems in metallurgical production. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2015, no. 4 (82), pp. 192–194. (In Russ.).

Received May 07, 2015

УДК 669.02/09

**МОДЕЛЬ ИСПАРЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ  
ПРИ ПЛАВКЕ В ВАКУУМНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ПЕЧИ\****Михайлов А.М.<sup>1</sup>, генеральный директор (alex.alloys@gmail.com)**Зубарев К.А.<sup>2</sup>, магистрант 2-го курса кафедры «Металлургия стали и ферросплавов» (st-kirill@mail.ru)**Котельников Г.И.<sup>2</sup>, к.т.н., доцент кафедры «Металлургия стали  
и ферросплавов» (gikotelnikov@yandex.ru)**Семин А.Е.<sup>2</sup>, д.т.н., профессор кафедры «Металлургия стали  
и ферросплавов» (asemin2007@yandex.ru)**Григорович К.В.<sup>2,3</sup>, член-корр. РАН, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Металлургия стали  
и ферросплавов», зав. лабораторией (konstantin.grigorovich@gmail.com)*<sup>1</sup> Научно-технический центр «Технологии Специальной Металлургии»  
(119017, Россия, Москва, Малый Толмачевский пер., 8/11)<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)<sup>3</sup> Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН  
(119991, Россия, Москва, Ленинский пр., 49)

**Аннотация.** Проблема выплавки никелевых сплавов в вакуумной индукционной печи (ВИП) состоит в том, чтобы обеспечить рафинирование металла и сохранить легирующие элементы и никель. Задача работы состояла в создании модели поведения всех компонентов сложнолегированных сплавов при плавке в ВИП в глубоком вакууме. В качестве лимитирующей стадии принят акт перехода компонента в газовую фазу. Величину потока каждого компонента сплава в газовую фазу в этих условиях определяли по уравнению Лангмюра. Модель дает адекватные результаты прогноза по испарению компонентов сложнолегированных сплавов на никелевой основе при их выплавке в вакуумной индукционной печи. Созданный алгоритм позволяет рассчитывать изменение во времени массы и состава сплавов на основе никеля при рафинировании их в вакуумной индукционной печи выбранной вместимости при заданном остаточном давлении и температуре.

**Ключевые слова:** модель, испарение, уравнение Лангмюра, никелевые сплавы, вакуум, индукционная печь, конденсат.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-35-38

Плавка в глубоком вакууме способствует рафинированию металла от большинства примесей [1, 2]. В то же время ценные легирующие элементы, а также никель, могут при этом испаряться, что затрудняет обеспечение стабильности химического состава сплава от плавки к плавке. В связи с этим задача данной работы состояла в создании модели поведения всех компонентов сложнолегированных сплавов при рафинировании в вакууме. Это должно помочь в подборе шихтовых материалов, разработке методов эффективного удаления примесей из металла и создании ресурсосберегающей технологии производства.

При низком остаточном давлении в вакуумной камере массоперенос в газовой фазе обычно не определяет процесс испарения. При плавке металла в вакуумной индукционной печи (ВИП) наблюдается интенсивное перемешивание металла. В связи с этим в первом

приближении пренебрежем затруднениями в доставке компонентов на границу раздела металл–газ. Тогда в качестве стадии, определяющей поведение всех компонентов металла, можно принять акт перехода компонента в газовую фазу (испарение компонента).

Плотность потока компонентов в газовую фазу при глубоком вакууме, кг/(м<sup>2</sup>·с), рассчитывается по уравнению Лангмюра [3 – 5]:

$$w_i = \alpha_i (p_i - p_{\text{ост}}) \sqrt{\frac{M_i}{2\pi RT}}, \quad (1)$$

где  $p_i$  – равновесное давление пара данного компонента над расплавом заданного состава, Па;  $p_{\text{ост}}$  – остаточное давление в вакуумной индукционной печи, Па;  $M_i$  – относительная атомная (или молекулярная в случае удаления H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> и др.) масса компонента  $i$ ;  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $R = 8314$  Дж/(К·кг–моль);  $T$  – температура сплава, К;  $\alpha_i$  – коэффициент Лангмюра, принимающий значения от 0 до 1.

Величину  $\alpha_i$  (коэффициент экранирования) принимали равной 1. Исключение сделано для двух элемен-

\* Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы». Проект № 14.578.21.0023 «Разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий производства сложнолегированных марок сталей и сплавов с заданными свойствами для деталей и узлов авиакосмической техники».

тов – Mn ( $\alpha_{Mn} = 0,05$ ) и Pb ( $\alpha_{Pb} = 0,1$ ). Значения коэффициентов  $\alpha_i$  подобраны в результате пробного счета по модели и сравнения результатов расчета с экспериментальными данными [6, 7].

Величину  $p_i$  определяем по закону Рауля [8]:

$$p_i = p_i^0 x_i \gamma_i, \quad (2)$$

где  $p_i^0$  – давление насыщенного пара над жидким чистым компонентом  $i$ ;  $x_i$  – мольная доля компонента  $i$  в сплаве;  $\gamma_i$  – коэффициент активности компонента.

Коэффициент активности  $\gamma_i$  рассчитывали по формуле [9]

$$\gamma_i = \gamma_i^\infty \frac{A_{осн} f_i}{A_{спл}}, \quad (3)$$

где  $\gamma_i^\infty$  – коэффициент активности элементов в бесконечно разбавленном растворе в никеле при температуре 1873 К [5, 10, 11];  $f_i$  – коэффициент активности, описывающий отклонение реального раствора от модели бесконечно разбавленного раствора (БРР) при условии использования массовых долей;  $A_{спл}$  и  $A_{осн}$  – масса моля сплава и его основы соответственно [12].

Для расчета  $f_i$  использовали параметры взаимодействия из работ [10, 13]:

$$\lg f_{i, \tau+\Delta\tau} = \sum e_i^j [\% j]_{\tau+\Delta\tau}. \quad (4)$$

Экстраполяцию значений  $\gamma_{i, \tau+\Delta\tau, T}$  с 1873 К на температуру расплава  $T$  проводили по теории квазирегулярных растворов [5]:

$$\ln \gamma_{i, \tau+\Delta\tau, T} = \frac{1873}{T} \frac{7000 - T}{7000 - 1873} \ln \gamma_{i, \tau+\Delta\tau, 1873}. \quad (5)$$

Значение  $p_i^0$  рассчитывали по уравнению [14]

$$\lg p_i^0 = A + \frac{B}{T} + C \lg T + DT, \quad (6)$$

где  $A, B, C, D$  – постоянные величины, принятые по справочнику [14].

Недостающие значения  $p_i^0$  рассчитывали самостоятельно по данным о теплоте испарения компонента и температуре кипения [15].

Определив плотность потока  $w_i$ , найдем поток компонента  $W_i = w_i S$ , испаряющегося с поверхности металлической ванны  $S$ .

Зададим некоторый достаточно малый шаг рафинирования расплава по времени  $\Delta t$ . Тогда изменение массы каждого компонента расплава через период  $\Delta t$ :

$$\Delta m_{i, \tau} = W_{i, \tau} \Delta t. \quad (7)$$

В момент времени  $\tau + \Delta t$  масса компонента  $i$  будет равна

$$m_{i, \tau+\Delta\tau} = m_{i, \tau} - \Delta m_{i, \tau}. \quad (8)$$

Общая масса расплава через период  $\Delta t$  в момент времени  $\tau + \Delta t$  будет равна

$$m_{\Sigma, \tau+\Delta\tau} = m_{\Sigma, \tau} - \sum \Delta m_{i, \tau}. \quad (9)$$

Концентрация  $i$ -го элемента в металле в момент времени  $\tau + \Delta t$ :

$$[\% i]_{\tau+\Delta\tau} = \frac{m_{i, \tau+\Delta\tau}}{m_{\Sigma, \tau+\Delta\tau}} \cdot 100 \%. \quad (10)$$

Зная изменение массы  $\Delta m_{i, \tau}$  каждого компонента за период  $\Delta t$  и предполагая, что все компоненты  $i$  конденсируются на холодном корпусе печи, можно найти массу конденсата  $\Delta m_{\Sigma, \tau}$ , образовавшегося за  $\Delta t$ :

$$\Delta m_{\Sigma, \tau} = \sum_i \Delta m_{i, \tau}. \quad (11)$$

Тогда концентрация компонента  $i$  в конденсате, образовавшемся за период времени  $\Delta t$ , будет равна:

$$[\% i]_{\text{конд., } \tau+\Delta\tau} = \frac{\Delta m_{i, \tau}}{\Delta m_{\Sigma, \tau}} \cdot 100 \%. \quad (12)$$

Вышеизложенный алгоритм позволяет найти состав и массу сплава и конденсата к моменту окончания элементарного периода рафинирования  $\Delta t$ . Эти характеристики могут быть сохранены в базе расчетных данных для последующей распечатки и построения графиков.

После окончания «первого» периода  $\Delta t$  можно приступить к формированию исходных данных, необходимых для расчета плотности потока испаряющихся компонентов  $w_{i, \tau+\Delta\tau}$  в следующем и последующих интервалах времени  $\Delta t$ .

Сумма молей всех компонентов в 100 граммах расплава:

$$\sum n_{i, \tau+\Delta\tau} = \sum \frac{[\% i]_{\tau+\Delta\tau}}{A_i}, \quad (13)$$

где  $A_i$  – относительная атомная масса  $i$ -го компонента сплава.

Тогда мольная доля компонента  $i$  в момент времени  $\tau + \Delta t$  равна:

$$x_{i, \tau+\Delta\tau} = \frac{[\% i]_{\tau+\Delta\tau}}{A_i \sum n_{i, \tau+\Delta\tau}}. \quad (14)$$

Масса конденсата, выделившегося за всю плавку:

$$m_{\text{конд., } \tau_{\text{пл}}} = \sum_{\tau}^{\tau=\tau_{\text{пл}}} \sum_{i=1}^k \Delta m_{i, \tau}. \quad (15)$$

Следовательно, средний состав конденсата можно рассчитать по уравнению

$$[\% i]_{\text{конд., сред.}} = \frac{\sum_{\tau=\tau_{\text{пл}}}^{\tau_{\text{конд.}}} \Delta m_{i,\tau}}{\sum_{\tau} \sum_{i=1}^k \Delta m_{i,\tau}} \cdot 100 \% \quad (16)$$

Для проверки адекватности модели использованы экспериментальные данные [7] по испарению марганца и никеля из сплавов Ni–Mn в вакуумной печи Таммана (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что разработанная модель хорошо описывает экспериментальные данные.

Вторая система, на которой была оценена адекватность данной модели, имеет следующий состав: 76 % Ni; 15 % Cr; 6 % W; 3 % Mo [6]. Эксперимент по испарению свинца из него проводили в 15 кг вакуумной индукционной печи при давлении 2,66 Па и температуре 1500 °С. Экспериментальные данные в виде отношения конечного содержания свинца к начальному представлены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, модель хорошо описывает экспериментальные данные по удалению свинца из сплава.

Других экспериментальных данных по испарению элементов из жаропрочных сплавов, по которым можно было определить адекватность, в литературе не обнаружено. Поэтому в первом приближении можно считать, что модель дает адекватные результаты прогноза по испарению компонентов сложнoleгированных сплавов на никелевой основе при их выплавке в вакуумной индукционной печи. Следовательно, используя данную модель, можно оценить поведение всех компонентов этих сплавов при плавке в ВИП.

Таким образом, созданный алгоритм позволяет рассчитывать изменение массы и состава сплавов на основе никеля при рафинировании их в вакуумной индукционной печи выбранной вместимости при заданном остаточном давлении и температуре. Результаты расчетов могут быть использованы для совершенствования действующей технологии и разработки инновационных вариантов проведения плавки.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). – М.: МИСиС, 2001. – 632 с.
2. Белянчиков Л.Н. Оценка возможности испарительного рафинирования никелевых сплавов от вредных цветных примесей // Электротехнология. 2009. № 5. 24 – 32 с.
3. Физико-химические расчеты электросталеплавильных процессов. – 2-е изд. / В.А. Григорян, А.Я. Стомахин, Ю.И. Уточкин и др. – М.: МИСиС, 2007. – 318 с.
4. Линчевский Б.В. Вакуумная индукционная плавка. – М.: Металлургия, 1975. – 240 с.
5. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. – М.: Металлургия, 1987. – 271с.

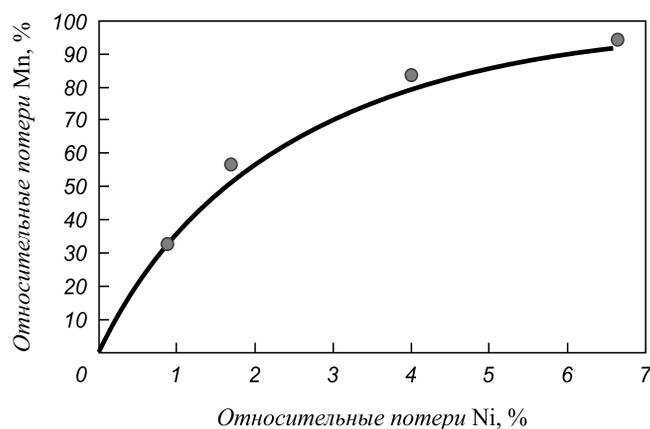


Рис. 1. Зависимость относительных потерь марганца от относительных потерь никеля. Линией представлены расчетные данные, полученные по вышеизложенной методике. Точки – экспериментальные данные [4]

Fig. 1. Dependence of relative losses of manganese from the relative losses of nickel. The line shows the data obtained by calculating with presented method. Points – experimental data [4]

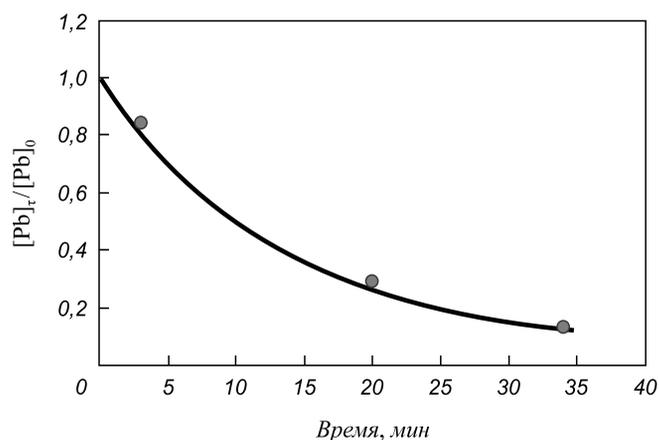


Рис. 2. Зависимость относительных потерь свинца от времени выдержки в ВИП. Линией представлены расчетные данные по вышеизложенной методике. Точки – экспериментальные данные [3]

Fig. 2. Dependence of relative loss of lead on the holding time in the VIF. The line shows the data calculated with presented method. Points – experimental data [3]

6. Производство стали и сплавов в вакуумных индукционных печах / Г.Н. Огороков, А.Г. Шалимов, В.М. Антипов, Н.А. Тулин. – М.: Металлургия, 1972. – 192 с.
7. Балковой Ю.В., Алеев Р.А., Григорян В.А., Баканов В.К. Термодинамические характеристики вакуумной обработки никель-марганцевых расплавов // Изв. вуз. Черная металлургия. 1985. № 11. С. 45 – 49.
8. Кубашевский О., Олкок К.Б. Металлургическая термехимия: Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1982. – 392 с.
9. Люпис К. Химическая термодинамика материалов. – М.: Металлургия, 1989. – 503 с.
10. Белянчиков Л.Н. Универсальная методика пересчета значений параметров взаимодействия элементов с одной основы сплава на другую на базе теории квазирегулярных растворов. Часть 2. Теоретические основы и адекватность модели пересчета // Электротехнология. 2009. № 2. С. 29 – 39.
11. Теория металлургических процессов / Д.И. Рыжонков, П.П. Арсентьев, В.В. Яковлев и др. – М.: Металлургия, 1989. – 392 с.

12. Свойства элементов. Т. 2. / М.Е. Дриц, А.М. Дриц, П.Б. Будберг и др. – М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2003. – 456 с.
13. Трофимов Е.А., Михайлов Г.Г. Анализ фазовых равновесий в системах Ni – С – О, Ni – Са – О и Ni – Al – О в условиях существования жидкого металла // Вестник ЮУрГУ. 2010. № 13. С. 4 – 7.
14. Морачевский А.Г., Сладков И.Б. Термодинамические расчеты в металлургии. – М.: Металлургия, 1993. – 304 с.
15. Рузинов Л.П., Гуляницкий Б.С. Равновесные превращения металлургических реакций. – М.: Металлургия, 1975. – 416 с.

Поступила 15 октября 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 1, pp. 35–38.

## MODEL OF EVAPORATION OF THE COMPONENTS AT THE NICKEL ALLOYS SMELTING IN A VACUUM INDUCTION FURNACE

**A.M. Mikhailov**<sup>1</sup>, General Director

(alex.alloys@gmail.com)

**K.A. Zubarev**<sup>2</sup>, Postraduate of the Chair “Metallurgy of Steel and Ferroalloys” (st-kirill@mail.ru)

**G.I. Kotelnikov**<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallurgy of Steel and Ferroalloys” (gikotelnikov@yandex.ru)

**A.E. Semin**<sup>2</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metallurgy of Steel and Ferroalloys” (asemin2007@yandex.ru)

**K.V. Grigorovich**<sup>2,3</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences (RAS), Head of the Chair “Metallurgy of Steel and Ferroalloys”, Head of the Laboratory (konstantin.grigorovich@gmail.com)

<sup>1</sup> Scientific and Technical Centre “Technologies of Special Metallurgy” (8/11, Malyy Tolmachevskiy lane, Moscow, Russia, 119017)

<sup>2</sup> National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS) (4, Leninskii ave., Moscow, 119049, Russia)

<sup>3</sup> Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences (49, Leninskii ave., 119049, Moscow)

**Abstract.** The problem of nickel alloys production is to refine the metal and to safe alloying elements and nickel. The aim of this work was to create a model of behavior of all components of complex alloys during melting in the vacuum induction furnace in a deep vacuum. The act of evaporation was taken as a limit stage. The flow of each component of the alloy in gas phase under these conditions was determined with the Langmuir equation. The model is adequate to predict the evaporation of components in complex alloys based on nickel during smelting in a vacuum induction furnace. The algorithm providing the calculation of mass and composition variation in time of nickel-based alloys during refining in a vacuum induction furnace with selected capacity, residual pressure and temperature is presented.

**Keywords:** model, evaporation, Langmuir equation, nickel alloys, vacuum, induction furnace, condensate.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-35-38

### REFERENCES

1. Kablov E.N. *Litye lopatki gazoturbinnykh dvigatelei (splavy, tekhnologiya, pokrytiya)* [Cast vanes of gas turbine engines (alloys, technology, coatings)]. Moscow: MISiS, 2001, 632 p. (In Russ.).
2. Belyanchikov L.N. Assessment of the possibility of evaporative refining of nickel alloys from detrimental non-ferrous impurities. *Elektrometallurgiya*. 2009, no. 5, pp. 24–32. (In Russ.).
3. Grigoryan V.A., Stomakhin A.Ya., Utochkin Yu.I. etc. *Fiziko-khimicheskie raschety elektrostaleplavil'nykh protsessov* [Physical and chemical calculations EAF processes]. Moscow: MISiS, 2007, 318 p. (In Russ.).
4. Linchevskii B.V. *Vakuumnaya induktsionnaya plavka* [Vacuum induction melting]. Moscow: Metallurgiya. 1975, 240 p. (In Russ.).
5. Grigoryan V.A., Belyanchikov L.N., Stomakhin A.Ya. *Teoreticheskie osnovy elektrostaleplavil'nykh protsessov* [Theoretical foundations of EAF process]. Moscow: Metallurgiya. 1987, 271p. (In Russ.).
6. Okorokov G.N., Shalimov A.G., Antipov V.M., Tulin N.A. *Proizvodstvo stali i splavov v vakuumnykh induktsionnykh pechakh* [Production of steel and alloys in vacuum induction furnaces]. Moscow: Metallurgiya. 1972, 192 p. (In Russ.).
7. Balkovoi Yu.V., Aleev R.A., Grigoryan V.A., Bakanov V.K. Thermodynamic characteristics of the vacuum processing of nickel-manganese melts. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1985, no. 11, pp. 45–49 (In Russ.).
8. Kubaschewski O., Alcock C.B. *Metallurgical Thermochemistry*. Oxford, New York, Pergamon Press. 1967. (Russ. ed.: Kubaschewski O., Alcock C.B. *Metallurgicheskaya termokhimiya*. Moscow: Metallurgiya, 1982. 392 p.).
9. Lupis C.H.P. *Chemical thermodynamics of Materials*. New York: North Holland. 1983. 581 p. (Russ. ed.: Lupis C. *Khimicheskaya termodinamika materialov*. Moscow: Metallurgiya, 1989. 503 p.).
10. Belyanchikov L.N. Universal method of recalculating the values of interaction parameters of elements on one of the alloy base to another on the basis of the theory of quasi-regular solutions. Part 2: Theoretical basis and adequacy of the model of recalculating. *Elektrometallurgiya*. 2009, no. 2, pp. 29–39. (In Russ.).
11. Ryzhonkov D.I., Arsent'ev P.P., Yakovlev V.V. etc. *Teoriya metallurgicheskikh protsessov* [Theory of metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 392 p. (In Russ.).
12. Drits M.E., Drits A.M., Budberg P.B., Kuznetsov N.T., Panovko V.M. *Svoystva elementov* [Features of elements], vol. 2. Moscow: Izdatel'skii dom “Ruda i Metally”. 2003, 456 p. (In Russ.).
13. Trofimov E.A., Mikhailov G.G. Analysis of phase equilibria in Ni-CO, Ni-Ca-O and Ni-Al-O systems in the conditions of existence of liquid metal. *Vestnik YuUrGU*. 2010, no. 13, pp. 4–7. (In Russ.).
14. Morachevskii A.G., Sladkov I.B. *Termodinamicheskie raschety v metallurgii* [Thermodynamic calculations in metallurgy]. Moscow: Metallurgiya. 1993, 304 p. (In Russ.).
15. Ruzinov L.P., Gulyanitskii B.S. *Ravnesnye prevrashcheniya metallurgicheskikh reaktsii* [Equilibrium conversion of metallurgical reactions]. Moscow: Metallurgiya. 1975, 416 p. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was performed under the Federal Program “Research and development on priority directions of scientific-technological complex of Russia for 2014–2020”. Project no. 14.578.21.0023 “Development and introduction of resource-saving production technologies for complex steels and alloys with desired properties for parts and assemblies of aerospace engineering”.

Received October 15, 2015

УДК 621.744.535

## РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ОТЛИВКИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЕЕ ПОЛОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ СТЕРЖНЕМ

Савинов А.С., к.т.н., доцент, зав. кафедрой механики (savinov\_nis@mail.ru)

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова  
(455000, Россия, Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

**Аннотация.** Разработана математическая модель расчета напряженного состояния отливки при формировании ее полости цилиндрическим стержнем. Получены зависимости возникающих радиальных и окружных напряжений, а также распределенного контактного усилия, прогнозирующие силовое взаимодействие системы отливка – стержень при различном сочетании их жесткостей, выраженных модулями продольной упругости. Показано, что наибольшие напряжения возникают в слоях отливки, сопряженных с поверхностью стержня. Рассмотрено влияние температурного градиента, жесткости отливки и песчано-глинистой формовочной смеси, геометрических параметров отливки, отобразенных толщиной стенки и наружным радиусом, на величину возникающих в отливке радиальных и окружных напряжений, а также распределенного контактного усилия. Произведена оценка влияния этих факторов на напряженно-деформированное состояние стенки отливки, выраженное через эквивалентное напряжение, полученное с использованием второй гипотезы прочности.

**Ключевые слова:** отливка, литейный стержень, контактное давление, напряженное состояние, температурная усадка, жесткость стержня, модуль продольной упругости.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-39-42

Изготовление качественной литой заготовки сопряжено с необходимостью анализа большого количества факторов, влияющих на получение здорового бездефектного литья. Одним из таких факторов являются возникающие в процессе усадочной деформации напряжения, величина и совокупность которых может привести к образованию холодных или горячих трещин в теле отливки.

В практике литейного производства можно выделить три основных направления оценки возможного трещинообразования в отливке:

- оценка по технологическим литейным пробам [1 – 4];
- критериальная оценка горячеломкости [5 – 8];
- математическая оценка силового взаимодействия отливки и формы [9 – 11].

Однако в данных работах уделено недостаточно внимания взаимодействию отливки со стержнем.

При охлаждении отливки, полость которой формируется цилиндрическим стержнем, в результате усадочной деформации  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \alpha \Delta T R_b, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент температурного расширения,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;  $\Delta T$  – градиент по времени средней по толщине температуры стенки отливки,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $R_b$  – внутренний радиус отливки, м, происходит сжатие стержня ввиду уменьшения размеров отливки и растяжение тела литой заготовки при сопротивлении деформации стержня.

Для упрощения расчета возникающего напряженно-деформированного состояния отливки сплошной стержень заменим пустотелым с равнозначной ему жесткостью (рис. 1). Для этого рассчитаем приведенную толщину стенки пустотелого стержня так, чтобы модули упругости стержня и отливки были равны  $E_1$ :

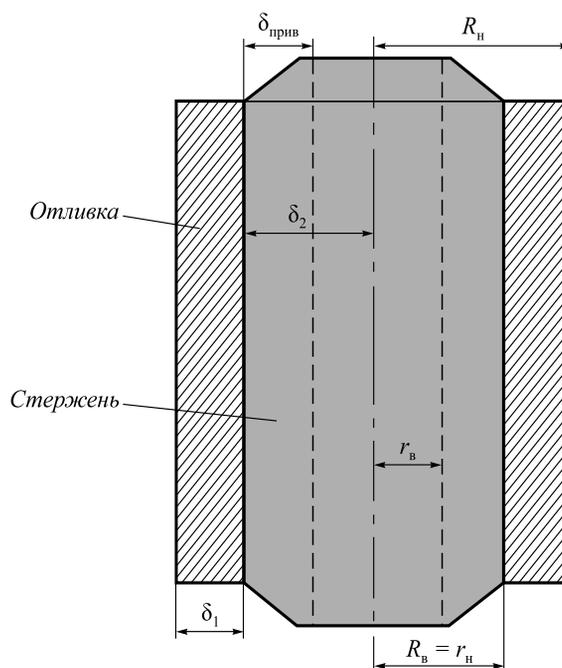


Рис. 1. Схема к расчету силового взаимодействия отливки и стержня

Fig. 1. Scheme of the power interaction of casting and rod

$$\delta_{\text{прив}} = \frac{\delta_2 E_2}{E_1}, \quad (2)$$

где  $\delta_2$  – толщина стенки стержня, м (см. рис. 1.);  $E_1, E_2$  – модуль продольной упругости отливки и стержня соответственно, МПа.

Таким образом, будет рассматриваться силовое взаимодействие двух цилиндров с толщинами стенок  $\delta_1$  и  $\delta_{\text{прив}}$ .

Рассчитаем растягивающую деформацию отливки  $U_{в1}$ , вызванную сопротивлением стержня:

$$U_{в1} = \frac{R_в P_к}{E_1} \left[ \frac{R_н^2 + R_в^2}{R_н^2 - R_в^2} + \mu \right], \quad (3)$$

где  $P_к$  – давление на границе контакта отливка-стержень, МПа;  $\mu$  – Коэффициент Пуассона, ед;  $R_н$  – наружный радиус отливки, м.

Деформация стержня  $U_{н2}$ , вызванная сжатием отливки, равна

$$U_{н2} = -\frac{r_н P_к}{E_1} \left[ \frac{r_н^2 + r_в^2}{r_н^2 - r_в^2} - \mu \right], \quad (4)$$

где  $r_н, r_в$  – соответственно наружный и внутренний радиус пустотелого стержня, м.

Из условия совместности деформации получим равенство [12]:

$$U_{в1} - \varepsilon = U_{н2}. \quad (5)$$

Подставив в выражение (5) уравнения (1), (3), (4), определим контактное давление на границе отливка – стержень:

$$P_к = \frac{\alpha \Delta T E_1}{\frac{R_н^2 + R_в^2}{R_н^2 - R_в^2} + \frac{r_н^2 + r_в^2}{r_н^2 - r_в^2}}. \quad (6)$$

Данная формула описывает взаимодействие отливки со стержнем при условии  $E_1 > E_2$ . В случае большей жесткости стержня  $E_2 > E_1$ , приведенная толщина стенки  $\delta_{\text{прив}}$  не рассчитывается, а выражение (6) примет следующий вид для сплошного стержня:

$$P_к = \frac{\alpha \Delta T}{\left( \frac{R_н^2 + R_в^2}{R_н^2 - R_в^2} + \mu_1 \right) E_1^{-1} + E_2^{-1}}; \quad (7)$$

для пустотелого:

$$P_к = \frac{\alpha \Delta T}{\left( \frac{R_н^2 + R_в^2}{R_н^2 - R_в^2} + \mu_1 \right) E_1^{-1} + \left( \frac{r_н^2 + r_в^2}{r_н^2 - r_в^2} \right) E_2^{-1}}. \quad (8)$$

Зная значение контактного давления  $P_к$ , не трудно определить величину радиальных и окружных напря-

жений, возникающих в стенке отливки, применив уравнения Ламе [13]:

$$\sigma_r = -\frac{P_к R_в^2}{R_н^2 - R_в^2} \left( \frac{R_н^2}{r^2} - 1 \right); \quad (9)$$

$$\sigma_0 = \frac{P_к R_в^2}{R_н^2 - R_в^2} \left( \frac{R_н^2}{r^2} + 1 \right), \quad (10)$$

где  $\sigma_r, \sigma_0$  – радиальные и окружные напряжения соответственно, МПа;  $r$  – текущая координата (максимальные напряжения  $\sigma_r$  и  $\sigma_0$  будут при  $r = R_в$ ), м.

Учитывая, что в температурном интервале хрупкости стали и сплавы ведут себя как хрупкие тела [11], для определения опасного состояния отливки используем вторую теорию прочности, которая применительно к данному случаю будет отображена в следующем виде:

$$\sigma_{\text{экр}}'' = \sigma_0 - \mu \sigma_r \leq \sigma_в, \quad (11)$$

где  $\sigma_{\text{экр}}''$  – эквивалентное напряжение по II теории прочности, МПа;  $\sigma_в$  – предел прочности материала, МПа.

Применим выражения (6) – (11) для анализа влияния различных факторов на возникающее напряженное состояние цилиндрической отливки из стали Ст.35Л при взаимодействии ее с сухим песчано-глинистым стержнем. Используемые в расчетах механические характеристики материала при высоких температурах вычислены по зависимостям, предложенным в работе [14]. Коэффициент Пуассона в расчетах принимался равным  $\mu = 0,3$ . Модуль продольной упругости материала стержня определен для следующего компонентного состава сухого стержня из песчано-глинистой смеси с содержанием связующего: 4 % каолиновой и 2 % бентонитовой глины [15]. Во всех исследуемых температурных интервалах выполнялось условие  $E_1 > E_2$ .

Распределение радиальных и окружных напряжений по толщине стенки отливки при температурном градиенте 100 °С изображено на рис. 2.

Влияние различных технологических факторов на возникающие максимальные напряжения представлено на рис. 3.

Проведенный анализ силового взаимодействия показал, что при понижении температуры литой стенки (увеличение температурного градиента) происходит увеличение максимальных значений как радиальных, так и окружных напряжений (рис. 3, а), связанное с линейной усадкой материала отливки. Снятие этих напряжений возможно своевременной выбивкой литой заготовки из формы.

Увеличение толщины стенки отливки  $\delta_1$  (рис. 3, б), несмотря на возрастание контактного давления  $P_к$ , снижает величину максимальных напряжений в виду увеличения сечения стенки отливки, а, следовательно, повышает сопротивление деформации, вызванное низкой податливостью стержня.

Анализ влияния геометрических параметров на напряженное состояние отливки показал, что с увеличени-

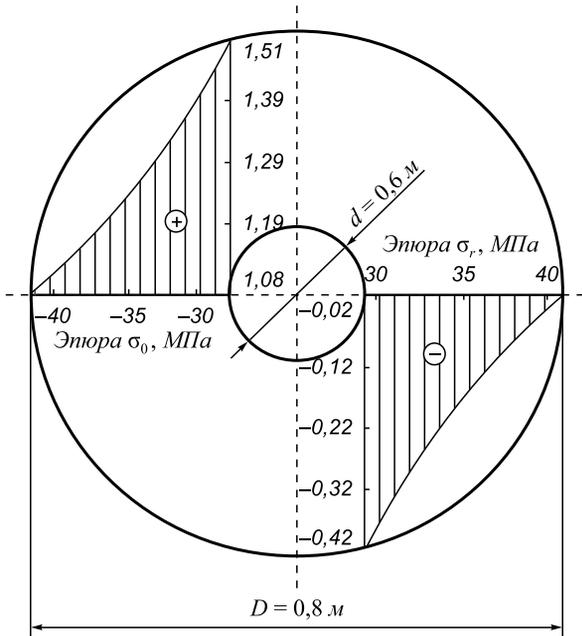


Рис. 2. Распределение радиальных и окружных напряжений по толщине стенки отливки

Fig. 2. Distribution of radial and tangential stresses at the wall thickness of the casting

ем внешних размеров при постоянной толщине ее стенки происходит повышение напряжений (рис. 3, в), так как с ростом радиуса отливки деформировать стержень значительно сложнее. Следовательно отливки с меньшим радиусом при одинаковой толщине стенки менее подвержены риску возникновения в них трещин.

Увеличение модуля продольной упругости материала отливки  $E_1$  и стержня  $E_2$  приводит к повышению напряжений (рис. 3, г). Анализируя динамику изменения контактного давления (см. рис. 3, г) видно, что модуль продольной упругости  $E_2$  обладает большим влиянием на величину контактного давления, нежели  $E_1$ . Следовательно технологическим управлением механическими свойствами литейных стержней (увеличением их податливости) возможно добиться более эффективной борьбы с трещинообразованием в отливке.

**Выводы.** В ходе проведенной работы получен математический аппарат, обеспечивающий прогнозирование напряженно-деформированного состояния в системе «отливка–литейный стержень». Разработанные модели могут быть использованы при количественном анализе напряжений в литой заготовке с целью исключения образования брака, связанного с появлением в ее теле горячих и холодных трещин.

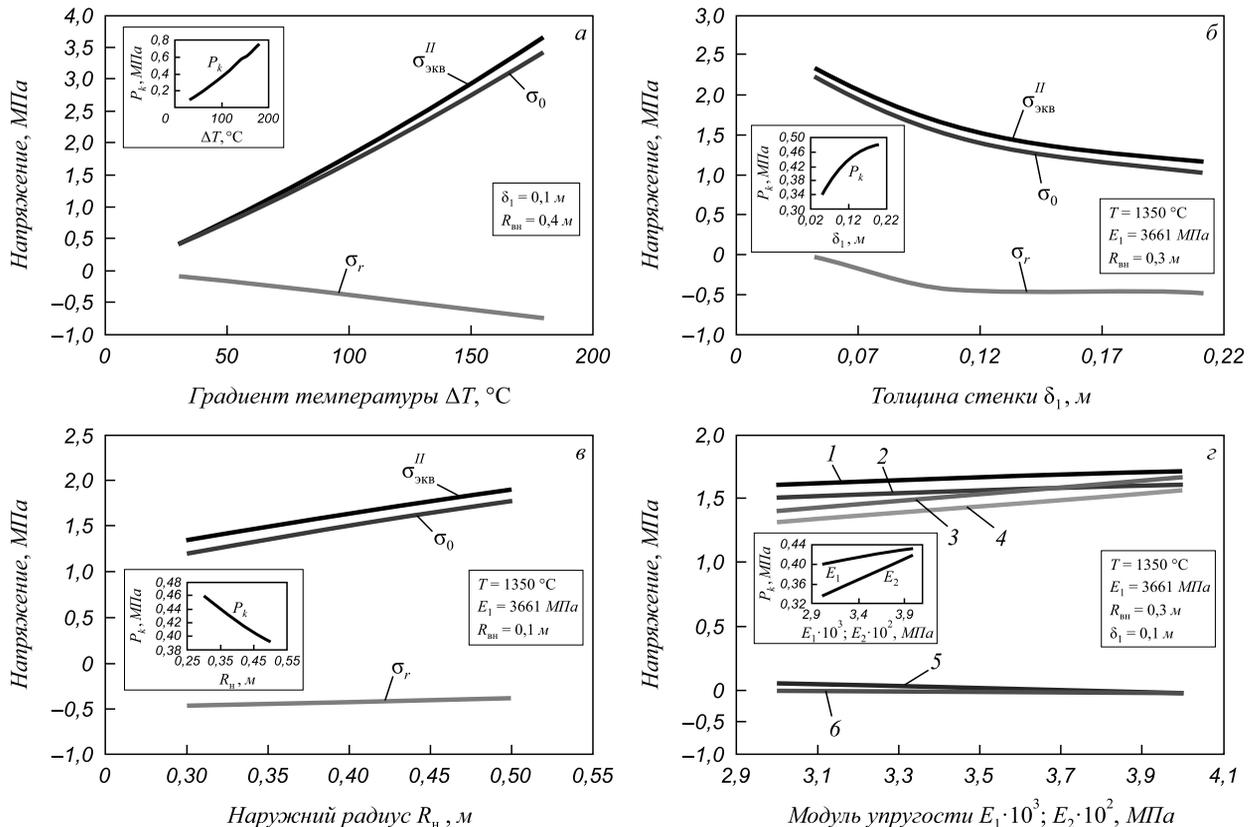


Рис. 3. Влияние различных факторов на контактное давление и напряжения в стенке отливки:

а – градиента температуры; б, в – геометрических параметров; г – модуля продольной упругости (1, 2, 6 –  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{II}}$ ,  $\sigma_0$ ,  $\sigma_r$  при варьировании  $E_1$ ; 3, 4, 5 –  $\sigma_{\text{экв}}^{\text{II}}$ ,  $\sigma_0$ ,  $\sigma_r$  при варьировании  $E_2$ )

Fig. 3. The influence of various factors on stress and contact pressure in the casting wall:

а – influence of the temperature gradient; б, в – geometrical parameters; г – modulus of elongation (1, 2, 6 –  $\sigma_{\text{eq}}^{\text{II}}$ ,  $\sigma_0$ ,  $\sigma_r$  at varying  $E_1$ ; 3, 4, 5 –  $\sigma_{\text{eq}}^{\text{II}}$ ,  $\sigma_0$ ,  $\sigma_r$  at varying  $E_2$ )

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шагалов В.Л., Попов С.И. Технологическая проба для испытания стали на трещиностойчивость // Литейное производство. 1989. № 5. С. 7 – 8.
2. Тимофеев А.А., Шумов И.Д. Проба на литейные напряжения // Литейное производство. 1971. № 7. С. 40 – 42.
3. Баландин Г.Ф., Гини Э.И., Матвиенко Ю.П. и др. Технологическая проба для борьбы с горячими трещинами в панельных отливках // Изв. вуз. Машиностроение. 1964. № 1. С. 198 – 203.
4. Швецов В.И., Кулаков Б.А., Иванов М.А. Особенности производства отливок из стали. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2014. – 240 с.
5. Бочвар А.А., Рыкалин Н.Н., Прохоров И.И. и др. К вопросу о горячих кристаллизационных трещинах при литье и сварке // Литейное производство. 1960. № 10. С. 47.
6. Баландин Г.Ф., Каширцев Л.П. Реологическое исследование трещиностойчивости отливок во время их затвердевания // Литейное производство. 1978. № 1. С. 5 – 8.
7. Рыбачук С.И., Десницкий В.В., Примак И.Н. и др. Математическая модель вероятности образования горячих трещин в отливках // Литейное производство. 1980. № 3. С. 2 – 3.

8. Вдовин К.Н., Савинов А.С., Феоктистов Н.А. Прогнозирование трещиностойчивости крупных стальных отливок // Литейное производство. 2014. № 12. С. 8 – 10.
9. Баландин Г.Ф., Степанов Ю.А. О силовом взаимодействии затвердевающей отливки и формы // Литейное производство. 1962. № 4. С. 37 – 41.
10. Гуляев Б.Б. Литейные процессы. – М.: Машгиз, 1960. – 416 с.
11. Константинов Л.С., Трухов А.П. Напряжения деформации и трещины в отливках. – М.: Машиностроение, 1981. – 199 с.
12. Савинов А.С., Тубольцева А.С., Синицкий Е.В. Анализ силового взаимодействия литой детали с формой // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2011. С. 623 – 626.
13. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопrotivление материалов. – М.: Высш. шк., 1975. – 654 с.
14. Морозейский Л.И., Митенев О.А. Исследование отливки широких слябов в кристаллизаторы с волнистой поверхностью // Проблемы стального слитка. Физико-химические процессы кристаллизации стальных слитков: Сб. науч. тр. – М.: Металлургия, 1967. № 2. С. 439 – 447.
15. Савинов А.С., Тубольцева А.С., Дзюба В.П. и др. Исследование физических свойств сухих песчано-глинистых литейных форм. – М., 2012. – 10 с. Деп. в ВИНТИ 11.03.2012. № 82 - В2012.

Поступила 20 марта 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 1, pp. 39–42.

CALCULATIONS FOR THE STRENGTH OF CASTING AT THE FORMATION OF ITS CAVITY BY CYLINDRICAL ROD

A.S. Savinov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair of Mechanics (savinov\_nis@mail.ru)

Magnitogorsk state technical university named after G.I. Nosov (38, Lenina ave., Magnitogorsk, 455000, Russia)

**Abstract.** The mathematical model of stress calculation of casting at forming of its cavity by cylindrical rod has been analyzed in the paper. The dependencies of arising radial and tangential stresses were determined, as well as distributed contact pressure predicting force interaction of the “casting-rod” system in various combinations of stiffness expressed by modulus of elongation. It is shown that the highest stresses occur in the layers of casting adjacent to the rod surface. The influence of the temperature gradient, the rigidity of the casting and sand-clay molding sand, casting geometric parameters displayed wall thickness and the outer radius, on the value of appearing in the casting of radial, tangential and equivalent stresses, as well as the distribution of contact forces has been considered. The impact of these factors on the strain-stress state of the casting wall, expressed in terms of equivalent stress obtained using the second hypothesis strength has been estimated.

**Keywords:** casting, rod, contact pressure, temperature shrinkage, rod hardness, modulus of elongation.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-39-42

REFERENCES

1. Shagalov V.L., Popov S.I. Technological sample for testing of steel on crack resistance. *Liteinoe proizvodstvo*. 1989, no. 5, pp. 7–8. (In Russ.).
2. Timofeev A.A., Shumov I.D. Test for casting stress. *Liteinoe proizvodstvo*. 1971, no. 7, pp. 40–42. (In Russ.).
3. Balandin G.F., Gini E.I., Matvienko Yu.P. etc. Technological samples for controlling hot cracks in panel moldings. *Izvestiya VUZov. Mashinostroenie*. 1964, no. 1, pp. 198–203. (In Russ.).
4. Shvetsov V.I., Kulakov B.A., Ivanov M.A. *Osobennosti proizvodstva otlivok iz stali: monografiya* [Features of the production of steel castings: monograph]. Chelyabinsk: Izdatel'skii tsentr YuUrGU, 2014, 240 p. (In Russ.).

5. Bochvar A.A., Rykalin N.N., Prokhorov I.I. etc. On the hot solidification cracks during casting and welding. *Liteinoe proizvodstvo*. 1960, no. 10, p. 47. (In Russ.).
6. Balandin G.F., Kashirtsev L.P. Rheological investigation of crack resistance of castings during their solidification. *Liteinoe proizvodstvo*. 1978, no. 1, pp. 5–8. (In Russ.).
7. Rybachuk S.I., Desnitskii V.V., Primak I.N. etc. Mathematical model of hot cracking formation probability in castings. *Liteinoe proizvodstvo*. 1980, no. 3, pp. 2–3. (In Russ.).
8. Vdovin K.N., Savinov A.S., Feoktistov N.A. Prediction of crack resistance of large steel castings. *Liteinoe proizvodstvo*. 2014, no. 12, pp. 8–10. (In Russ.).
9. Balandin G.F., Stepanov Yu.A. On force interaction of solidifying casting and mold. *Liteinoe proizvodstvo*. 1962, no. 4, pp. 37–41. (In Russ.).
10. Gulyaev B.B. *Liteinye protsessy* [Foundry processes]. Moscow: Mashgiz, 1960, 416 p. (In Russ.).
11. Konstantinov L.S., Trukhov A.P. *Napryazheniya deformatsii i treshchiny v otlivkakh* [Deformation stresses and cracks in castings]. Moscow: Mashinostroenie, 1981. – 199 s. (In Russ.).
12. Savinov A.S., Tubol'tseva A.S., Sinitskii E.V. Analysis of the force mold- shape interaction. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. Samara: Izd-vo Samarskogo nauchnogo tsentra RAN, 2011, pp. 623–626. (In Russ.).
13. Darkov A.V., Shpiro G.S. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow: Vysshaya shkola, 1975, 654 s. (In Russ.).
14. Morozeiskii L.I., Mitenev O.A. The study of casting of wide slabs into molds with wavy surface. In: *Problemy stal'nogo slitka. Fiziko-khimicheskie protsessy kristallizatsii stal'nykh slitkov: sb. nauch. tr.* [Problems of steel ingot. Physical and chemical processes of crystallization of steel ingots: Coll. of sci.papers]. Moscow: Metallurgiya, 1967, no. 2, pp. 439–447. (In Russ.).
15. Savinov A.S., Tubol'tseva A.S., Dzyuba V.P. etc. Investigation of the physical properties of dry sand-clay molds. *Dep. VINITI*, no. 82 - V2012. Moscow: 2012, 10 p. (In Russ.).

Received March 20, 2015

УДК 669.15, 54.143

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЦЕНТРОБЕЖНОЛИТЫХ ЧУГУННЫХ ЗАГОТОВОК ОБРАБОТКОЙ РАСПЛАВОВ КАРБОНАТАМИ ЩЗМ\*

**Панов А.Г.<sup>1</sup>**, д.т.н., доцент кафедры материалов, технологий и качества (alexey@modifier.ru)

**Цепелев В.С.<sup>2</sup>**, д.т.н., профессор, директор Исследовательского центра физики  
металлических жидкостей Института материаловедения и металлургии

**Конашков В.В.<sup>2</sup>**, к.т.н., старший научный сотрудник

<sup>1</sup>Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета  
(423810, Россия, Республика Татарстан, Набережные Челны, пр. Мира, 68/19)

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

**Аннотация.** Показано, что одной из причин образования дефектов структуры центробежнолитых чугуновых заготовок, изготовленных из временных шихтовых материалов, является непредсказуемая микронеоднородность расплавов. Исследована возможность устранения указанной нестабильности с помощью обработки чугуновых расплавов рафинирующе-модифицирующими материалами типа БСК на основе карбонатов бария и стронция. Одной из главных проблем является отсутствие четких представлений о строении расплавов чугунов в термо-временных условиях литейного производства. Микронеоднородность при этом обуславливается различными структурными составляющими, унаследованными из шихтовых материалов. Кроме того, на структуру расплава и качество получаемых отливок оказывают влияние особенности операций рафинирования и модифицирования расплавов. Приведены результаты промышленных экспериментов по влиянию различных способов рафинирования и модифицирования на качество получаемых отливок. На основе полученных данных разработан оптимальный способ рафинирования и модифицирования промышленных чугунов.

**Ключевые слова:** отливка, чугун, расплав, структура, модифицирование, однородность, рафинирование, фазовый состав, температурно-временной режим, качество продукции.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-43-48

Как известно, чугун обладает широким диапазоном свойств в зависимости от структурного состояния имеющегося в его составе углерода. В то же время, несмотря на многочисленные исследования, до настоящего времени не разработано теории формообразования содержащих углерод фаз чугуна [1], в связи с чем остается проблема разработки технологии стабильного получения чугуновых отливок с прогнозируемыми свойствами.

Структурообразование промышленных чугунов определяется многочисленными факторами. К наиболее существенным относят термодинамическое и термокинетическое влияние химических элементов и, прежде всего, углерода – элемента с широчайшим комплексом структур и свойств [2 – 11]. Благодаря способности создавать связи  $sp$ -,  $sp^2$ -,  $sp^3$ -гибридизации, углерод имеет большое количество аллотропных модификаций (графит, алмаз, лонсдейлит, аморфный углерод, карбин, чаоит, фуллерены, фуллериты, нанотрубки, графены и т. д.). Об открытии большинства из этих материалов было заявлено лишь во второй поло-

вине XX в., они мало изучены, а имеющаяся информация о них неоднозначна и порой противоречива. Кроме широко известных и недавно открытых модификаций углерода, существует множество других углеродных материалов, микроструктура которых зависит от способов их приготовления. Они отличаются большим разнообразием и поэтому с трудом поддаются четкой классификации [12].

В литейном материаловедении чугуна известны также весьма многочисленные фазы как свободного углерода, так и фазы, содержащие углерод в растворенном и связанном состоянии. Наиболее подробно изучен свободный углерод в виде пластинчатого, спелевого, вермикулярного, вырожденного (чанки) и шаровидного графита, связанный – в виде феррита ( $\alpha$ -феррит,  $\delta$ -феррит,  $\epsilon$ -феррит, видманштеттов феррит), мартенсита, аустенита и цементита. При этом физико-химическое состояние растворенного углерода точно неизвестно даже в железе. Принято считать, что углерод в нем преимущественно находится в атомарном состоянии, причем он может быть связан с железом псевдометаллическими связями, а при более низких температурах допускают образование углерода в полиатомарном состоянии в форме гексагональных колец.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке. Постановление № 211 Правительства РФ, контракт № 02.А03.21.0006.

Работа поддержана в рамках научных исследований высших учебных заведений РФ по государственному заданию № 2014/236.

Установлено [13], что полиморфные превращения в железе (при 911 °С – переход из неплотной ОЦК  $\alpha$ -модификации в плотную кубическую  $\gamma$ -фазу; при 1392 °С – переход из плотной кубической  $\gamma$ -фазы в ОЦК  $\delta$ -фазу; при 1538 °С – переход в плотную  $\epsilon$ -модификацию; при 1700 °С – переход к статистически плотной упаковке шаров с понижением плотности при повышении температуры перегрева) приводят к изменению внешней электронной конфигурации свободных атомов железа ( $3d^64s^2$ ). При полиморфных превращениях дискретный  $4s^2$ -уровень расщепляется в широкую энергетическую полосу, а  $\alpha$ -орбитали меняют свою протяженность и, как следствие, химическую активность, что может приводить к образованию различных соединений с углеродом в расплаве.

Одной из главных составляющих указанной проблемы является отсутствие четких представлений о строении расплавов чугунов в термо-временных условиях литейного производства. Анализ эволюции моделей, описывающих строение чугуновых расплавов (табл. 1), показывает, что за последние полвека у специалистов появилась определенность лишь в том, что чугуновые расплавы микронеоднородны. Микронеоднородность при этом обуславливается различными структурными составляющими, унаследованными из

шихтовых материалов. Природа большинства описываемых структур носит дискуссионный характер и инструментально не определена. Из производственной практики известно, что, помимо указанных в таблице, промышленные чугуновые расплавы содержат различные случайные или специальные неметаллические включения, а также физико-химические связи поверхностно-активных элементов, таких как кислород и сера [14].

До сих пор остаются дискуссионными вопросы, что является графитным зародышем и как происходит рост графита различной формы, поскольку они экспериментально точно не установлены. На уровне гипотез зародышами графита в расплаве рассматриваются: пластинки, составленные из базисных слоев (плоских макромолекул), фуллериты, карбиды, различные неметаллические включения и газовые пузырьки. В зависимости от состояния расплава и условий его охлаждения рост зародыша приводит к образованию графитных включений разной формы.

В последние десятилетия в практике отечественного литейного производства резко изменились структура шихты и качество ее отдельных составляющих, а именно – резко увеличилась степень синтетичности за счет внедрения электропечной плавки, увеличения доли от-

Таблица 1

**Эволюция моделей, описывающих строение чугуновых расплавов [1]**

*Table 1. Evolution of the models, describing the structure of cast-iron melts)*

Годы	Структурные элементы расплавов	Авторы
1960-е, 1970-е	Истинный раствор Fe – C (углерод и железо в атомарном состоянии)	Богачев И.Н., Бунин К.П. и др.
1972	Зародыш графита представляет собой пластинку, составленную из базисных слоев (плоских макромолекул)	Бунин К.П.
1960-е, 1970-е	Коллоид, в котором содержатся микрочастицы кристаллического графита, жидкости ОЦК и ГЦК	Иванов Д.П., Вертман А.А., Самарин А.М.
1979	Углерод в свободном виде, в растворе Fe ОЦК и ГЦК, а также в виде Fe <sub>3</sub> C с постепенным разрушением связей при нагреве	Шумихин В.С.
1988	Электростатический разряд (ЭСР) с ближним порядком по типу цементита Fe <sub>3</sub> C	Романова А.В.
1960-е, 1970-е, 2002	Субмикронеоднородный расплав на основе углеродных комплексов, образующихся в результате поэтапной полимеризации углерода в бесконечные иерархические структуры	Жуков А.А., Давыдов С.В.
2007	Наличие в расплаве $\delta$ -фазы, $\gamma$ -фазы, L <sub><math>\delta</math></sub> , L <sub><math>\gamma</math></sub>	Кимстач Г.М.
2007	Субмикронеоднородный расплав с ЭСР типа Fe <sub>3</sub> C	Барышев Е.Е.
2007	Три эвтектических расплава (L <sub>II</sub> , L <sub>I</sub> и L <sub>g</sub> ), один монотектический (L <sub>M1</sub> (Fe <sub>3</sub> C)) и один, получающийся при нагреве перестроением L <sub>g</sub> -расплава в L <sub>g</sub> , перестраивающийся, в свою очередь, при дальнейшем нагреве в статистическую (атомарную) жидкость	Белов Б.Н.
1980-е, 2010-е	Двухфазная дисперсная система из 2 %-го раствора углерода в $\gamma$ -Fe и цементита. Свободный графит неустойчив	Залкин В.М.
2012	Нестабильная аустенитно-цементитная и аустенитно-графитная дисперсные системы с большим временем живучести	Макаренко К.В.

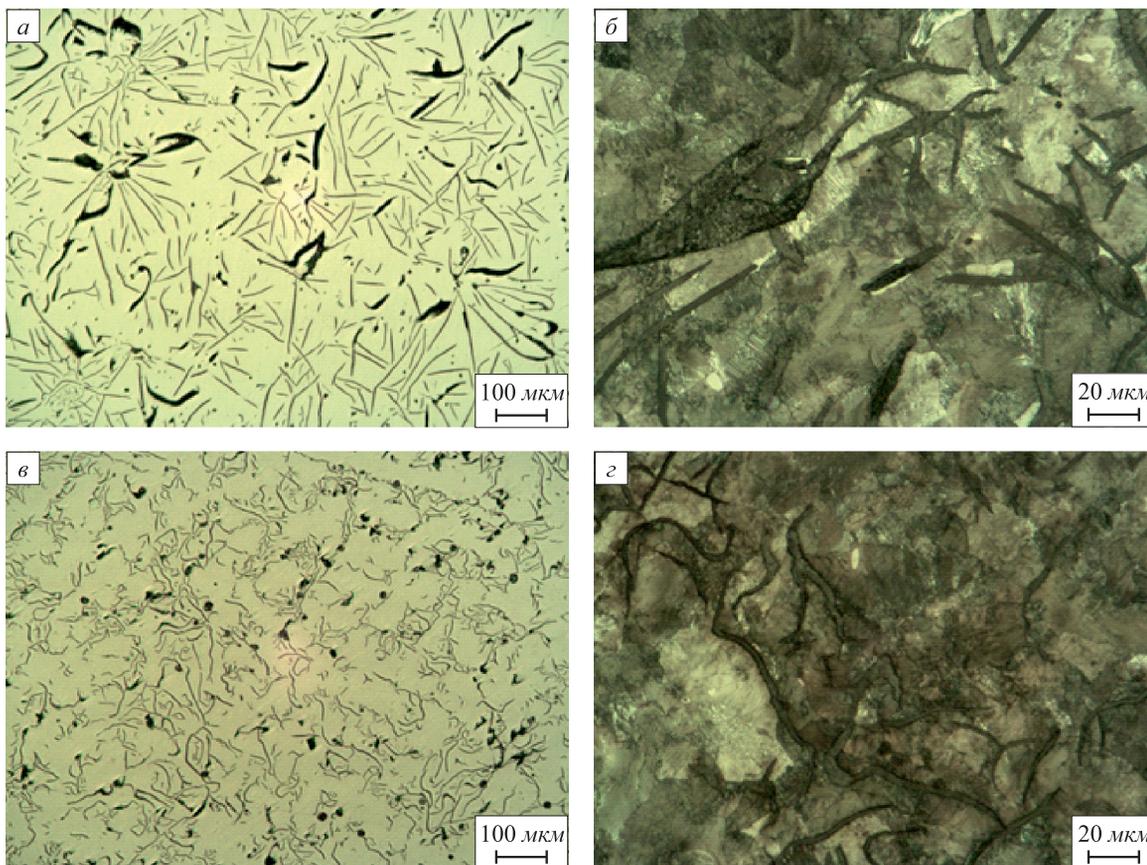
носителем дешевых стального лома и науглероживателей, содержащих нерегламентированные примеси [14]. Все это сказалось на усложнении и непредсказуемости строения расплавов в термовременных условиях чугунолитейного производства, что сопровождается ростом дефектности структуры отливок, увеличением доли возврата собственного производства с «плохой наследственностью» и, как следствие, снижением эффективности производства.

Одним из решений указанной проблемы является активно развивающаяся обработка чугуновых расплавов рафинирующе-модифицирующими материалами на основе барий-стронциевых карбонатов [15 – 17]. Новую технологическую операцию в настоящее время уже постоянно применяют литейные производства автомобилестроения (КАМАЗ, АВТОВАЗ, УАЗ и др.) при изготовлении отливок в песчано-глинистые формы. Исследовано влияние обработки чугуновых расплавов карбонатами ЩЗМ (модификатор Р-20) при изготовлении отливок «гильза» в металлические формы центробежным способом. Для этого проанализированы макро- и микроструктуры поперечного сечения брусков, продольно вырезанных из отливок, полученных без обработки (стандартный вариант) и с обработкой модифи-

катором Р20 (опытный вариант) с модифицированием ФС65Ba4 в обоих вариантах.

Визуальный осмотр образцов показал, что они отличаются по качеству внутренней поверхности. Опытные отливки имели наиболее гладкую и ровную поверхность, что соответствует наибольшей жидкотекучести расплава. Отливки стандартной технологии имели шероховатую поверхность, требующую больший припуск на механическую обработку примерно на 0,5...1 мм (~5 % металлоемкости отливки). Характерные микроструктуры чугунов представлены на рисунке, результаты исследования микроструктуры и механических свойств – в табл. 2.

Микроструктура чугуна стандартного варианта – равномерно распределенный с небольшим количеством колоний пластинчатый графит, преимущественно прямолинейный с длиной включений 45 – 90 мкм, у внутреннего рабочего края – до 200 мкм, в количестве 12 %. Металлическая основа: перлит пластинчатый в количестве 96 – 98 % с межпластинчатым расстоянием 0,3 мкм и фосфидная эвтектика в виде отдельных включений площадью не более 2000. По обоим краям на глубину 1,0 – 1,2 мм присутствует феррит ~ до 8 %.



Микроструктура отливок «гильза» из экспериментальных чугунов:  
а, б – стандартных, в, з – опытных; а, в –  $\times 100$ , не травлено, б, з –  $\times 500$ , травлено

Microstructure of castings like “sleeve” from experimental cast-iron:  
а, б – standard, в, з – tested; а, в –  $\times 100$ , не травлено, б, з –  $\times 500$ , травлено

**Микроструктура и механические свойства экспериментальных чугунов**

*Table 2. Microstructure and mechanical properties of experimental cast-iron*

Вариант	Графит	Матрица	$\sigma_b$	НВ
Стандарт	ПГф1(2) ПГр1,3 ПГд45-90 по рабочему краю 180- 200 ПГ12 максимальное количество выкрашивающегося графита	Пт1 П98(Ф2) Пд0,3 ФЭр1 ФЭп2000	232	207
Опытный	ПГф1,2 ПГр1,3(9) ПГд45-90 по рабочему краю 180 ПГ10-12 количество выкрашивающегося графита незначительное	Пт1 П(Ф0) Пд0,3 ФЭр1 ФЭп2000	245 – 260	217 – 241

Микроструктура чугуна опытного варианта – так же равномерно распределенный с небольшим количеством колоний пластинчатый графит практически полностью прямолинейный с увеличением доли завихренного и длиной включений 45 – 90 мкм, у внутреннего рабочего края до 180 мкм и в количестве 10 – 12 %. Крупного прямолинейного графита значительно меньше, чем в стандартном чугуне. Металлическая основа: 100 % перлит пластинчатый с межпластинчатым расстоянием 0,3 мкм и фосфидная эвтектика в виде отдельных включений площадью не более 2000. По обоим краям так же присутствует феррит ~ до 8 %, но на меньшую глубину (0,7 – 0,8 мм).

Таким образом, обработка рафинирующе-модифицирующим материалом Р20 приводит к улучшению качества внутренней поверхности отливок (позволяет уменьшить припуски на механическую обработку), значительному увеличению стабильности аустенита и, как следствие, увеличению доли перлита, увеличению твердости, увеличению прочности, уменьшению обезуглероживания матрицы (уменьшает долю феррита) на поверхности отливки. Обработка Р20 приводит также к некоторому завихрению графита, уменьшению его доли и снижению количества крупного выкрашивающегося графита.

На основании результатов экспериментальных работ было принято решение о проведении недельных промышленных испытаний. Начиная с третьего дня испытаний в шихте использовался возврат собственного производства, прошедший обработку модификатором Р20. Во время испытаний выявлено постепенное полное исчезновение в микроструктуре матрицы феррита, значительное уменьшение выкрашивающегося графита, увеличение уровня и стабильности прочности и твердости чугуна. Динамика изменения механических свойств отливок чугуна представлена в таб. 3.

**Выводы.** Анализ современных представлений о строении чугунных расплавов и производственной практики показывает, что в термовременных условиях литейного производства расплавы микрогетерогенны, имеют разнообразные изменчивые структурные составляющие, строение которых в настоящее время точно не определено и зависит от исходной структуры шихтовых материалов. Для стабилизации структуры и свойств

отливок в таких условиях применяется обработка расплава рафинирующе-модифицирующими материалами типа БСК (Р20) на основе карбонатов щелочноземельных металлов.

Исследование влияния такой обработки на качество центробежнолитых чугунных заготовок показало, что она приводит к повышению общей однородности структуры, стабилизации аустенита (измельчению продуктов распада аустенита, подавлению ферритообразования в теле отливки и уменьшению глубины обезуглероженного слоя на поверхности отливки), повышению прочности и твердости серого чугуна без увеличения склонности к отбелу.

Выявленные эффекты достигаются без изменения химического состава чугуна на основании результатов визуального наблюдения процесса обработки в соответствии с квазихимической моделью микронеоднородного строения расплавов, а также явлением структурной наследственности сплавов и объясняются [14]:

- перемешиванием расплава за счет движения газов, повышающим макрооднородность расплава;
- рафинирующим действием оксидов Ва и Sr;
- дегазирующим действием пузырьков  $\{CO_2 + CO\}$ ;
- зародышеобразующим действием оксидов Ва и Sr и продуктов их взаимодействия с неметаллическими включениями в локально переохлажденных микрообъемах расплава за счет диссоциации карбонатов и расширения микропузырьков  $\{CO_2 + CO\}$ ;
- разрушающим механическим воздействием микропузырьков  $\{CO_2 + CO\}$ , имеющих размеры

Таблица 3

**Динамика механических свойств чугуна в промышленных испытаниях**

*Table 3. Change of mechanical properties of cast iron at industrial tests*

Показатель	Порядковый день опытной недели					
	1	2	3	4	5	6
$\sigma_b$	251	248	245	245	256	267
НВ	235	241	248	248	248	248

порядка десятков и сотен микрометров, на элементы структуры расплава, за счет чего повышается его микрооднородность.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панов А.Г. О строении чугуновых расплавов // *Металлургия машиностроения*. 2014. № 5. С. 6 – 12.
2. Давыдов С.В. Влияние термокинетических факторов на структурообразование в графитизированных чугунах: Дисс. ... докт. тех. наук. – Брянск: БГТУ, 2002. – 376 с.
3. Шешуков О.Ю., Вязникова Е.А., Смирнова В.Г. Влияние структуры модификатора на механические свойства чугуна // *Расплавы*. 2012. № 3. С. 68 – 72.
4. Шешуков О.Ю., Вязникова Е.А., В.Г. Смирнова В.Г. О влиянии структуры модификатора на механические свойства чугуна // *Тр. XIII Рос. конф. «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов. Взаимосвязь структуры и свойств кристаллического, нанокристаллического и неупорядоченного состояний»*. – Екатеринбург: Уральский центр академического обслуживания, 2011. Т. 4. С. 90 – 93.
5. Кульбовский И.К., Поддубный А.Н., Богданов Р.А., Булдин С.В. Влияние химического состава на свойства и структуру высокопрочного чугуна // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2007. № 5. С. 11 – 13.
6. Мельников В.П. Влияние переохлаждения расплава при затвердевании на структуру чугуна крупных цилиндрических отливок // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2006. № 1. С. 4 – 6.
7. Сильман Г.И., Камынин В.В., Харитоненко С.А. Влияние кремния на структуру и свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2006. № 6. С. 38 – 41.
8. Попов П.И., Сизов И.Г. Влияние легирующих элементов на структуру и свойства чугуна с вермикулярным графитом // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2006. № 6. С. 41 – 43.
9. Рожкова Е.В., Орехова А.И., Белов В.Д., Базлова Т.А. Управление первичной структурой хромистого чугуна // *Черные металлы*. 2010. № 1. С. 9 – 12.
10. Афонаскин А.В. Исследование влияния комплексного модифицирования чугуна на структуру, механические свойства и обрабатываемость кокильных отливок после графитизирующего отжига // *Литейщик России*. 2010. № 3. С. 42 – 44.
11. Сильман Г.И., Камынин В.В., Гончаров В.В. Влияние меди на структуру и свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2010. № 6. С. 43 – 48.
12. Хайманн Р.Б., Евсюков С.Е. Аллотропия углерода // *Природа*. 2003. № 8. С. 66.
13. Григорович В.К. Новые данные о диаграмме железо–углерод и влиянии легирующих элементов на графито- и карбидообразование в чугунах // *Литейные свойства сплавов: Сб. тр.* – Киев: Наукова думка, 1968. Ч 1. С. 78–80.
14. Панов А.Г., Бейлис Л.М., Аникеев В.В., Никитин В.И. Стабильное модифицирование высокопрочных чугунов. Метод, модификаторы, технологии // *LAP LAMBERT Academic Publishing*. – Saarbrücken, Deutschland, 2013. – 342 с.
15. Панов А.Г. Управление кристаллизацией чугуна ваграночной плавки при изготовлении отливок изложниц // *Литейщик России*. 2011. № 6. С. 25 – 27.
16. Панов А.Г. Гуртовой Д.А. Практика обработки карбонатами ШЗМ расплавов дуговой плавки при изготовлении отливок из высокопрочного чугуна // *Литейщик России*. 2012. № 8. С. 25 – 27.
17. Кулахметов А.Н., Кузнецов А.А., Иванов С.В. и др. Опыт применения рафинирующе-модифицирующих материалов БСК-2-УС и Р20 в условиях чугунолитейного производства ОАО «АВТОВАЗ» // *Литейщик России*. 2014. № 11. С. 41 – 44.

Поступила 30 декабря 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 1, PP. 43–48.

## RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF QUALITY IMPROVEMENT OF CENTRIFUGAL CASTING BILLETS MADE FROM CAST-IRON BY PROCESSING OF MELTS BY ALKALINE EARTH METALS CARBONATES

*A.G. Panov<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Materials, Technology and Quality (alexey@modifier.ru)*

*V.S. Tsepelev<sup>2</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Research Center of Physics of Metallic Liquids of the Institute of Materials and Metallurgy*

*V.V. Konashkov<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher*

<sup>1</sup>*Naberezhnye Chelny branch of the federal “Kazan (Volga) Federal University” (68/19 Mira ave., Naberezhnye Chelny, Republic of Tatarstan, 423810, Russia)*

<sup>2</sup>*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)*

**Abstract.** The authors have shown that the unpredictable micro heterogeneous of cast iron melts is a reason for structural defect of the billets, manufactured by centrifugal casting. The possibility of eliminating of this reason by treatment of BSC-type materials, based on alkaline earth metal carbonates was investigated. One of the main problems is lack of clear ideas of a structure of fusions of cast-iron in thermo-time conditions of foundry production. Microinhomogeneity thus is caused by various structural components inherited

from the burdening of materials. Besides, features of operations of refinement and modifying of fusions have impact on structure of fusion and quality of produced castings. Results of industrial experiments on influence of various ways of refinement and modifying on quality of produced castings are given. On the basis of the obtained data the optimum way of refinement and modifying of industrial cast iron was developed.

**Keywords:** casting, cast iron, melt, structure, modifying, homogeneity, refinement, phase structure, thermo-time regime, product quality.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-1-43-48

#### REFERENCES

1. Panov A.G. The structure of cast iron melts. *Metallurgiya mashinostroeniya*. 2014, no. 5, pp. 6–12. (In Russ.).
2. Davydov S.V. *Vliyaniye termokineticheskikh faktorov na strukturoobrazovanie v grafitizirovannykh chugunakh: diss. ... dokt. tekh. nauk* [Influence of thermo-kinetic factors on the structure formation in graphitic cast irons: Dr. Tech. Sci. Diss.]. Bryansk: BGTU. 2002, 376 p. (In Russ.).
3. Sheshukov O.Yu., Vyaznikova E.A., Smirnova V.G. Effect of modifier structure on the mechanical properties of cast iron. *Rasplavy*. 2012, no. 3, pp. 68–72. (In Russ.).

4. Sheshukov O.Yu., Vyaznikova E.A., Smirnova V.G. Effect of the modifier structure on mechanical properties of cast iron. In: *Stroenie i svoystva metallicheskih i shlakovykh rasplavov. Vzaimosvyaz' struktury i svoystv kristallicheskogo, nanokristallicheskogo i neuporyadochennogo sostoyanii: Tr. XIII Ros. konf.* [Structure and properties of metallic and slag melts. Connection of the structure and properties of crystalline, nanocrystalline and disordered states: Proc. Of the XIII Russian Conf.]. Ekaterinburg: Ural'skii tsentr akademicheskogo obsluzhivaniya, 2011, vol.4, pp. 90–93. (In Russ.).
  5. Kul'bovskii I.K., Poddubnyi A.N., Bogdanov R.A., Buldin S.V. Effect of chemical composition on the properties and structure of high-strength cast iron. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2007, no. 5, pp. 11–13. (In Russ.).
  6. Mel'nikov V.P. Effect of hypothermia during the solidification of the melt on the structure of cast iron of the large cylinder castings. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2006, no. 1, pp. 4–6. (In Russ.).
  7. Sil'man G.I., Kamynin V.V., Kharitonenko S.A. Effect of silicon on the structure and properties of high-strength spherulitic iron. *Metal Science and Heat Treatment*. 2006, vol. 48, no. 5–6, pp. 268–271.
  8. Popov P.I., Sizov I.G. Effect of alloying elements on the structure and properties of iron with vermicular graphite. *Metal Science and Heat Treatment*. 2006, vol. 48, no. 5–6, pp. 272–275.
  9. Rozhkova E.V., Orekhova A.I., Belov V.D., Bazlova T.A. Control of the primary structure of chromium cast iron. *Cher nye metally*. 2010, no. 1, pp. 9–12. (In Russ.).
  10. Afonaskin A.V. The investigation of the effect of complex modification on cast iron structure, mechanical properties and machinability of die castings after graphitizing annealing. *Liteishchik Rossii*. 2010, no. 3, pp. 42–44. (In Russ.).
  11. Sil'man G.I., Kamynin V.V., Goncharov V.V. Effect of copper on the structure and properties of high-strength cast iron with nodular graphite. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2010, no. 6, pp. 43–48. (In Russ.).
  12. Khaimann R.B., Evsyukov S.E. Carbon allotropes. *Priroda*. 2003, no. 8, p. 66. (In Russ.).
  13. Grigorovich V.K. New data on the iron-carbon diagram and the influence of alloying elements on the formation of carbide and graphite in cast iron. In: *Liteinye svoystva splavov: sb. tr.* [Casting properties of alloys: Coll. of sci. papers]. Kiev. Naukova dumka. 1968. Part. 1, pp. 78–80. (In Russ.).
  14. Panov A.G., Beilis L.M., Anikeev V.V., Nikitin V.I. *Stabil'noe modifitsirovanie vysokoprochnykh chugunov. Metod, modifikatory, tekhnologii* [Stable modifying of high-strength cast iron. Method, modifiers, technologies]. LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrucken, Deutschland, 2013. 342 p. (In Russ.).
  15. Panov A.G. Control of crystallization of iron of cupola melting at manufacture of casting molds. *Liteishchik Rossii*. 2011, no. 6, pp. 25–27. (In Russ.).
  16. Panov A.G. Gurtovoi D.A. The practice of treatment of arc melting melts by alkali earth metal carbonates at manufacture of castings of high-strength cast iron. *Liteishchik Rossii*. 2012, no. 8, pp. 25–27. (In Russ.).
  17. Kulakhmetov A.N., Kuznetsov A.A., Ivanov S.V. etc. Experience of refining-modifying materials BSK-2 and CS-P20 at cast-iron production of OJSC "AVTOVAZ". *Liteishchik Rossii*. 2014, no. 11, pp. 41–44. (In Russ.).
- Acknowledgements.** The work was financially supported by the Resolution no. 211 of the Government of the Russian Federation, contract no. 02.A03.21.0006.  
The work was supported as a research of universities of the Russian Federation on the state task no. 2014/236.

Received December 30, 2014

УДК 621.793

## ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ БЫСТРОЙ СМЕНЫ ПОГРУЖНЫХ СТАКАНОВ ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША СЛЯБОВОЙ МНЛЗ

*Еронько С.П., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Механическое оборудование заводов черной металлургии» (ersp@meta.ua)*

*Ошовская Е.В., к.т.н., доцент кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии»*

*Ткачев М.Ю., аспирант кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии»*

Донецкий национальный технический университет  
(83000, Украина, Донецк, ул. Артема, 58)

**Аннотация.** Освещены перспективы применения систем быстрой замены погружных стаканов промежуточных ковшей слябовых машин непрерывного литья заготовок и обоснована необходимость их дальнейшего совершенствования с целью повышения надежности. Приведены методика и результаты экспериментальных исследований силовых параметров работы привода механизма перемещения погружных стаканов при различном конструктивном исполнении опорно-прижимного узла разливочной системы для условий обеспечения трения скольжения и трения качения между опорной поверхностью металлической обоймы защитного огнеупорного изделия и прижимающими его элементами. Установлено, что в случае замены в опорном узле плоских прижимных элементов роликами суммарное значение коэффициента сопротивления перемещению погружных стаканов во время их быстрой смены может быть снижено с 0,6 – 1,3 до 0,4 – 1,0, что позволяет уменьшить в 1,2 – 1,3 раза нагрузку на гидравлический привод исследуемой разливочной системы промежуточного ковша МНЛЗ, а также увеличить срок ее безотказной работы в условиях реализации непрерывной разливки стали большими сериями. Полученные данные использованы при расчете и конструировании усовершенствованной системы быстрой смены погружных стаканов.

**Ключевые слова:** непрерывная разливка, погружной стакан, затягивание канала, быстрая смена стакана, опорный узел, система прижатия, трение качения, трение скольжения.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-49-56

Преимущества непрерывной разливки качественной стали на слябовую заготовку длинными сериями в полной мере проявляются в том случае, когда удается решить комплекс задач, связанных с обеспечением соответствующей стойкости футеровки промежуточного ковша, огнеупорной части его разливочных устройств, а также с предотвращением затягивания погружных стаканов, защищающих разливаемый металл от вторичного окисления [1, 2]. По ряду известных причин канал защитного огнеупорного изделия часто зарастает вследствие отложения на его стенках тугоплавких неметаллических включений, а это неизбежно ведет к нарушению скоростного режима разливки, установленного технологической инструкцией, и вызывает необходимость замены отработанного стакана новым. Вынужденная замена защитного огнеупорного элемента влечет за собой прекращение на некоторое время истечения жидкой стали в кристаллизатор, что не только вносит сбой в процесс разливки, но и снижает выход годного в среднем на 1,5 % из-за необходимости удаления из непрерывнолитой заготовки участка, на котором она формировалась с прерыванием поступления расплава из промежуточного ковша [3, 4]. В связи с этим промежуточные ковши современных слябовых МНЛЗ

укомплектованы системами быстрой замены погружных стаканов, разработанными известными зарубежными фирмами INTERSTOP, VESUVIUS и DANIELI [5 – 8].

В процессе замены погружного стакана на элементы разливочного устройства промежуточного ковша МНЛЗ действуют статические и динамические нагрузки, численные значения которых могут существенно изменяться в зависимости от условий применения механической системы. Статические силы сопротивления, препятствующие перемещению огнеупорных стаканов, обусловлены с одной стороны трением, возникающим на контактных поверхностях их фланцев, а также в опорном узле между металлической обоймой фланца и прижимными элементами, а с другой стороны – дополнительной нагрузкой, связанной с разрушением слоя отложений оксидов алюминия или корочки застывшего металла на стенках канала. Расчетные и экспериментальные данные свидетельствуют о том, что сила трения скольжения, возникающая между контактными поверхностями металлической обоймы фланца стакана и прижимными элементами опорной части, при различных условиях работы разливочного устройства составляет 30 – 35 % от суммарной нагрузки, дейст-

вующей на его привод [9]. Наряду с этим силы трения вызывают интенсивный износ контактной поверхности прижимных элементов, что требует их частой замены или применения сменных насадок, изготовленных из высокопрочной стали. Поэтому от надежности опорно-прижимного узла в значительной мере в целом зависит безотказность системы быстрой смены погружных стаканов [10]. Требуемая степень надежности указанного узла в системах вышеупомянутых фирм обеспечена за счет применения комплектов витых или тарельчатых цилиндрических пружин сжатия со строго регламентированными упругими характеристиками, которые с установленной периодичностью должны проходить обязательную проверку на специальных стендах и при необходимости заменяться полным комплектом, для чего необходима предварительная разборка всей разливочной системы. В связи с этим повышается не только стоимость разливочного устройства, но и издержки, связанные с его обслуживанием и эксплуатацией.

Следует отметить, что задача снижения сил сопротивления в узлах трения для металлургического оборудования, работающего в условиях высоких температур и запыленности, является весьма актуальной [11], а для ее успешного решения необходимо проведение как теоретических, так и детальных экспериментальных исследований [12, 13]. В частности, практический интерес представляет оценка возможности снижения нагрузки на гидравлический привод системы быстрой смены погружных стаканов за счет конструктивного изменения ее опорно-прижимного узла путем применения в нем тел качения (роликов). Это должно способствовать уменьшению значений силы сопротивления перемещению вышедшего из строя защитного огнеупорного изделия, подлежащего немедленной замене в процессе разливки. Данное уменьшение обусловлено

сокращением в суммарной нагрузке, преодолеваемой приводным гидроцилиндром, доли, приходящейся на силу трения, возникающей в опорно-прижимном узле под действием сжимающей силы блоков пружин  $F_{сж}$  и определяемой в случаях трения скольжения и трения качения соответственно по уравнениям

$$F_{тр1} = \mu F_{сж} \text{ и } F_{тр2} = \left( \frac{\mu d + 2k}{D} \right) F_{сж},$$

где  $\mu$  – коэффициент трения скольжения;  $d$  – диаметр цапфы, несущей свободно вращающийся ролик;  $k$  – коэффициент трения качения;  $D$  – наружный диаметр ролика опорно-прижимного узла.

Значение силы трения в опорно-прижимном узле, получаемое расчетом, в силу ряда причин (несимметричное приложение сдвигающей нагрузки к огнеупору, отсутствие точных справочных данных о коэффициентах трения, неравномерное распределение усилия, развиваемое сжимающими пружинами) может существенно отличаться от реального [14]. Учитывая это, информацию о степени снижения сопротивления перемещению сменного погружного стакана в случае применения роликовых опор вместо элементов скольжения получили опытным путем.

Для экспериментальной проверки эффективности принятого технического решения по изменению условий взаимодействия элементов опорно-прижимного узла, образующих пару трения, был изготовлен в масштабе 1:2 лабораторный образец системы быстрой смены погружных стаканов, общий вид которого показан на рис. 1. В конструктивном отношении он соответствовал классической схеме разливочных устройств данного класса и позволял в идентичных экспериментальных условиях поочередно использовать два варианта опор-

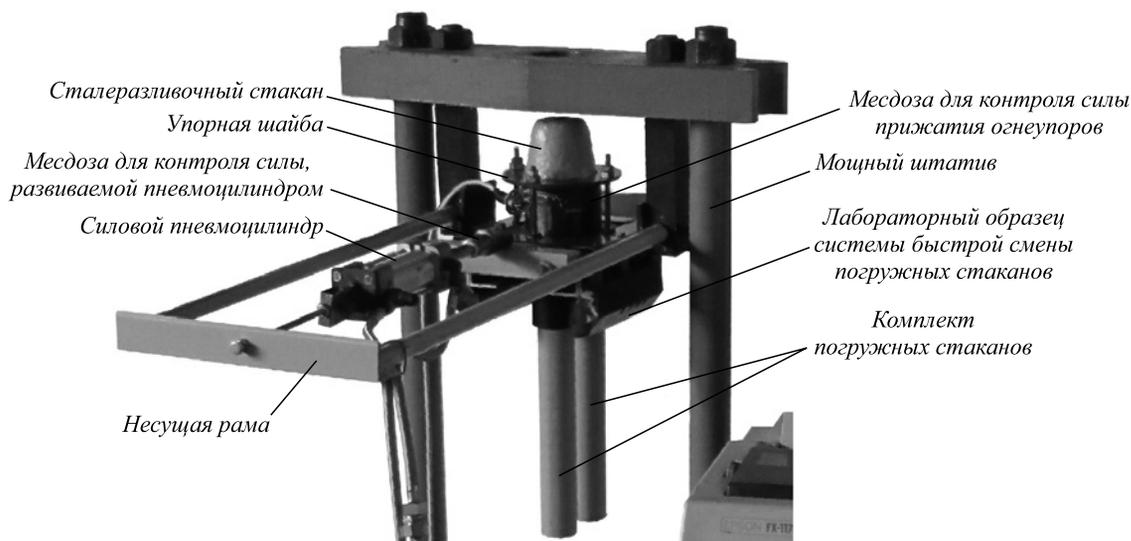


Рис. 1. Лабораторный образец системы быстрой смены погружных стаканов

Fig. 1. Laboratory sample of quick-change system of submerged nozzles

но-прижимного узла, при функционировании которых между их трибоэлементами действуют силы трения скольжения (рис. 2, *а*) или трения качения (рис. 2, *б*). Требуемую длительность процесса замены погружного стакана (не более 0,5 с) в исследуемой системе обеспечили пневматическим цилиндром, в рабочую полость которого подавали под давлением 0,8 МПа из баллона сжатый воздух.

Комплект огнеупорных изделий, предварительно изготовленных для проведения лабораторных экспериментов, включал разливочный и два погружных стакана, которые имели фланцы с размерами 85×115×25 мм, заключенные в металлические обоймы. Контактные поверхности скольжения фланцев всех трех стаканов после их термической обработки были подвергнуты шлифованию алмазным кругом.

Оценку в режиме реального времени сопротивления, преодолеваемого приводным цилиндром при перемещении комплекта погружных стаканов относительно разливочного стакана для фиксированных значений силы прижатия их фланцев, осуществляли с использованием контрольно-измерительного комплекса, включавшего две мсдозы, усилитель переменного тока, АЦП и ЭВМ.

Мсдоза для контроля усилия прижатия фланцев погружных стаканов к нижней части сталевыпускного стакана выполнена в виде гильзы, одним торцом опирающейся на его металлическую обойму, а другим контактирующей с упорной шайбой, жестко связанной посредством четырех шпилек с корпусом разливочной системы. На гильзе наклеены четыре фольговых датчика с сопротивлением 200 Ом каждый, соединенных по мостовой схеме. Рабочие тензодатчики, включенные в противоположные плечи моста, ориентированы вдоль образующих гильзы, а компенсационные – в окружном направлении, т. е. перпендикулярно рабочим.

Аналогично была выполнена и вторая мсдоза, предназначенная для контроля суммарной силы сопро-

тивления, преодолеваемой при замене погружного стакана приводным цилиндром. Она отличалась меньшим диаметром и крепилась к хвостовику штока цилиндра, т. е. передавала силу, сдвигающую комплект сменных огнеупоров.

Электрические сигналы, возникающие при разбалансе измерительных мостов в процессе измерений, по экранированным кабелям поступали на входы каналов усилителя переменного тока УТ4-1. Усиленные сигналы после преобразования аналого-цифровым преобразователем L-154 в двенадцатиразрядный числовой код обрабатывались при помощи прикладной программы OSCILLOSCOPE фирмы L-CARD, поставляемой в комплекте с АЦП.

Во время эксперимента при фиксированных значениях силы прижатия к разливочному стакану погружного стакана контролировали нагрузку, преодолеваемую в процессе его замены приводным цилиндром для двух вариантов конструктивного исполнения опорно-прижимного узла исследуемой механической системы, показанных на рис. 2. Характерный вид зарегистрированных при этом сигналов приведен на рис. 3.

Обработка и результаты анализа полученных экспериментальных данных позволили установить следующие характерные особенности изменения силы, затрачиваемой на перемещение сменного комплекта погружных стаканов. Независимо от конструктивного исполнения опорно-прижимного узла разливочной системы и задаваемого сжимающего усилия, в начале относительного сдвига погружных стаканов фиксируются максимальные значения суммарной силы сопротивления их совместному перемещению. Это связано с ударной нагрузкой, прикладываемой к сменному комплекту огнеупорных изделий, и возникновением динамической составляющей, доля которой достигает 25 – 30 %.

Замена пары трения скольжения парой трения качения в опорно-прижимном узле системы способствует снижению в 1,2 – 1,3 раза суммарной силы сопротивле-

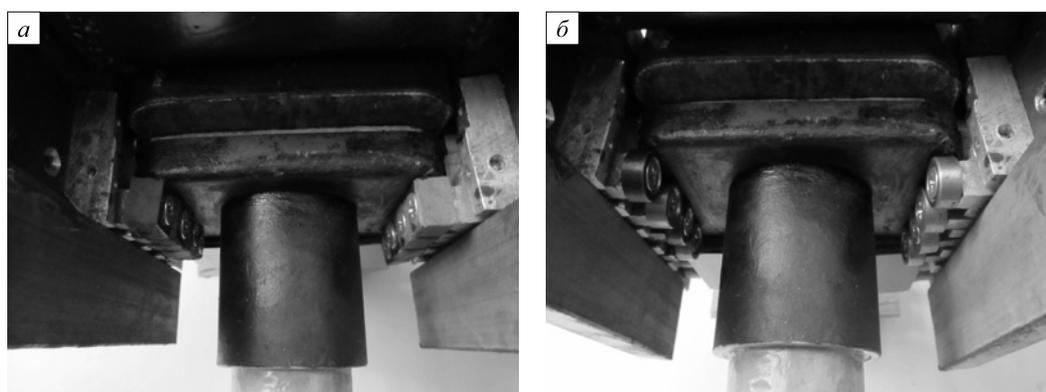


Рис. 2. Реализуемые варианты конструктивного исполнения опорно-прижимного узла системы быстрой смены погружных стаканов: с использованием пар трения скольжения (*а*) и пар трения качения (*б*)

Fig. 2. Implemented variants of design of support-clamping unit of quick-change system of submerged nozzles: using pairs of friction (*a*) and rolling friction pairs (*b*)

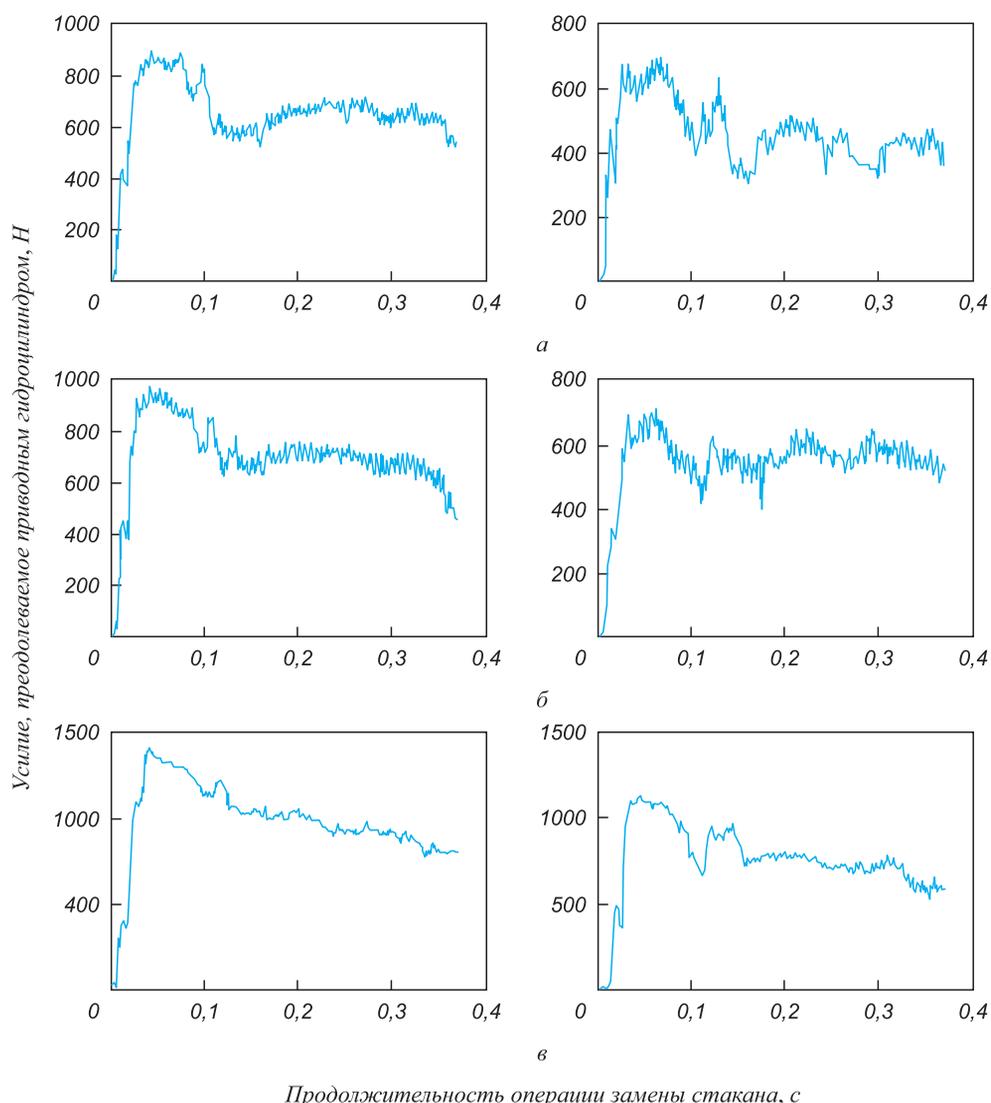


Рис. 3. Характер изменения силы сопротивления перемещению сменного комплекта погружных стаканов при силе их прижатия 500 Н (а), 1000 Н (б), 1500 Н (в) в случае действия в опорно-прижимном узле трения скольжения (левый столбец) и трения качения (правый столбец)

Fig. 3. Nature of changes in resistance force of displacement of replacement set of submerged nozzles with their pressing force of 500 N (a); 1000 N (б), 1500 N (в) in the case of actions in support-presser unit of sliding friction (left column) and rolling friction (right column)

ния перемещению сменного комплекта защитных огнеупоров. Вместе с этим на записях сигналов, относящихся к опорно-прижимному узлу, снабженному роликами, наряду с общим снижением значений действующей на привод нагрузки зафиксированы ее всплески по ходу перемещения сменного комплекта погружных стаканов. Число отмечавшихся скачков значений силы сопротивления в точности совпадало с числом пар прижимных роликов. Это связано с образованием опорными поверхностями состыкованных металлических обойм фланцев стаканов поперечно расположенной полости, в результате чего происходит кратковременное увеличение коэффициента трения качения в момент контакта стыка с цилиндрической поверхностью прижимного ролика (рис. 4).

Визуальный контроль состояния опорных поверхностей металлических обойм погружных стаканов после

их замены позволил также сделать вывод о том, что при цилиндрической форме опорных роликов велика вероятность нарушения их линейного контакта с прижимаемыми обоймами. Это связано с возможными отклонениями как в меньшую, так и в большую сторону толщины фланцев огнеупорных изделий от значений, принятых при проектировании разливочной системы. В этих случаях из-за поворота даже на малый угол элемента, несущего ролик, последний контактирует с опорной поверхностью металлической обоймы фланца стакана по схеме клиновое тело – плоскость (рис. 5), что приводит к росту деформаций в зоне контакта и увеличению коэффициента трения качения. Поэтому в опорно-прижимном узле промышленного образца разливочной системы целесообразно использовать ролики иной формы.

Результаты выполненных экспериментальных исследований послужили основой при расчете и конст-

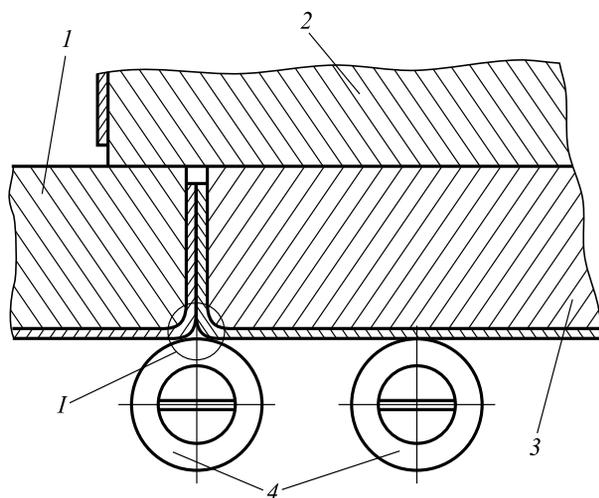


Рис. 4. Схема зоны контакта *I* опорных поверхностей состыкованных металлических обойм фланцев погружных стаканов с прижимным роликом:

*1, 3* – фланцы погружных стаканов; *2* – фланец разливочного стакана; *4* – прижимные ролики

Fig. 4. Scheme of the contact zone *I* of support surfaces of stacked metal clips of flanges of submerged nozzles with pressure roller:

*1, 3* – flanges of submerged nozzles; *2* – nozzle flange; *4* – pressure rollers

руировании запатентованной усовершенствованной разливочной системы (патент 104227 Украины) промежуточного ковша слябовой МНЛЗ, схематично представленной на рис. 6. Она включает металлический корпус *1*, снабженный средствами крепления в виде штырей *2* с отверстиями под клинья *3* к наружной поверхности дна промежуточного ковша *4*. Корпус имеет центральное вертикальное отверстие, в котором размещена нижняя часть сталевыпускного стакана *5*, закрепленного в гнездовом блоке *6*. В теле корпуса выполнен продольный направляющий паз для размещения рабочего *7* и резервного *8* огнеупорных погружных стаканов, верхние части которых помещены в металлические обоймы.

Погружной стакан примыкает снизу к сталевыпускному стакану и установлен с возможностью перемещения вдоль продольного паза силовым гидроцилиндром *9*. Прижатие погружного стакана к нижней части сталевыпускного стакана осуществляется механизмом, который включает поворотные элементы *10* с отверстиями, симметрично установленные на осях *11* по обе стороны погружного стакана вдоль оси его перемещения в направляющем пазу металлического корпуса. При этом каждый поворотный элемент снабжен консольно закрепленной цапфой *12*, несущей свободно вращающийся ролик *13*. Тело ролика имеет форму поверхности вращения с образующей в виде дуги с радиусом, составляющим  $0,5b \dots 0,5d$ , где *b* и *d* соответственно толщина и внешний диаметр ролика в поперечном сечении симметрии, находящиеся между собой в соотношении  $d/b = 2$ . Благодаря указанным значениям ге-

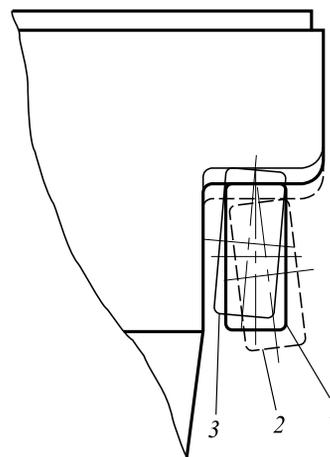


Рис. 5. Возможные схемы контакта цилиндрического прижимного ролика с опорной поверхностью металлической обоймы фланца погружного стакана при отклонении его толщины от заданного значения (*I*) в большую (*2*) или меньшую (*3*) сторону

Fig. 5. Possible schemes of the contact of cylindrical pressure roller with the bearing surface of metal clip of flange of submerged nozzle at a deviation of the thickness of the set value (*I*): more (*2*) or less (*3*)

ометрических параметров ролика, обеспечивается его постоянный контакт с опорной поверхностью металлической обоймы фланца огнеупорного стакана по схеме сферическое тело–плоскость при допустимых углах поворота элемента, несущего сам ролик. Это позволяет понизить значение коэффициента трения качения и в итоге уменьшить сопротивление, действующее в опорно-прижимном узле.

Передача усилия прижатия погружному стакану осуществляется благодаря кинематической связи поворотных элементов с предварительно сжатыми пружинами *15*. Пружины установлены в выполненных в корпусе наклонных цилиндрических каналах на направляющих стержнях *14* с поджатием к их опорным буртикам *16* с помощью винченных в цилиндрические каналы пробок *17*. Каждая из пробок своей торцевой частью выходит наружу металлического корпуса *1*. Для поворота пробок на их выходящих торцевых частях предусмотрены шлицы под отвертку или головки под ключ.

При обслуживании разливочного устройства для контроля жесткости пружин в отверстие каждого из поворотных элементов поочередно вводится хвостовик динамометрического ключа и с его помощью элемент поворачивают на небольшой угол на оси, сжимая пружину и контролируя по шкале ключа развиваемую ею силу. В случае необходимости регулирования усилия сжатой пружины пробку, контактирующую с нею, необходимо повернуть в резьбовом отверстии в нужном направлении, дополнительно сжимая или отпуская упругий силовой элемент. Если изменением высоты пружины не удастся достичь заданного значения усилия прижатия, ее заменяют новой, для чего предварительно выворачивают пробку из цилиндрического канала металлического корпуса. Такое конструк-

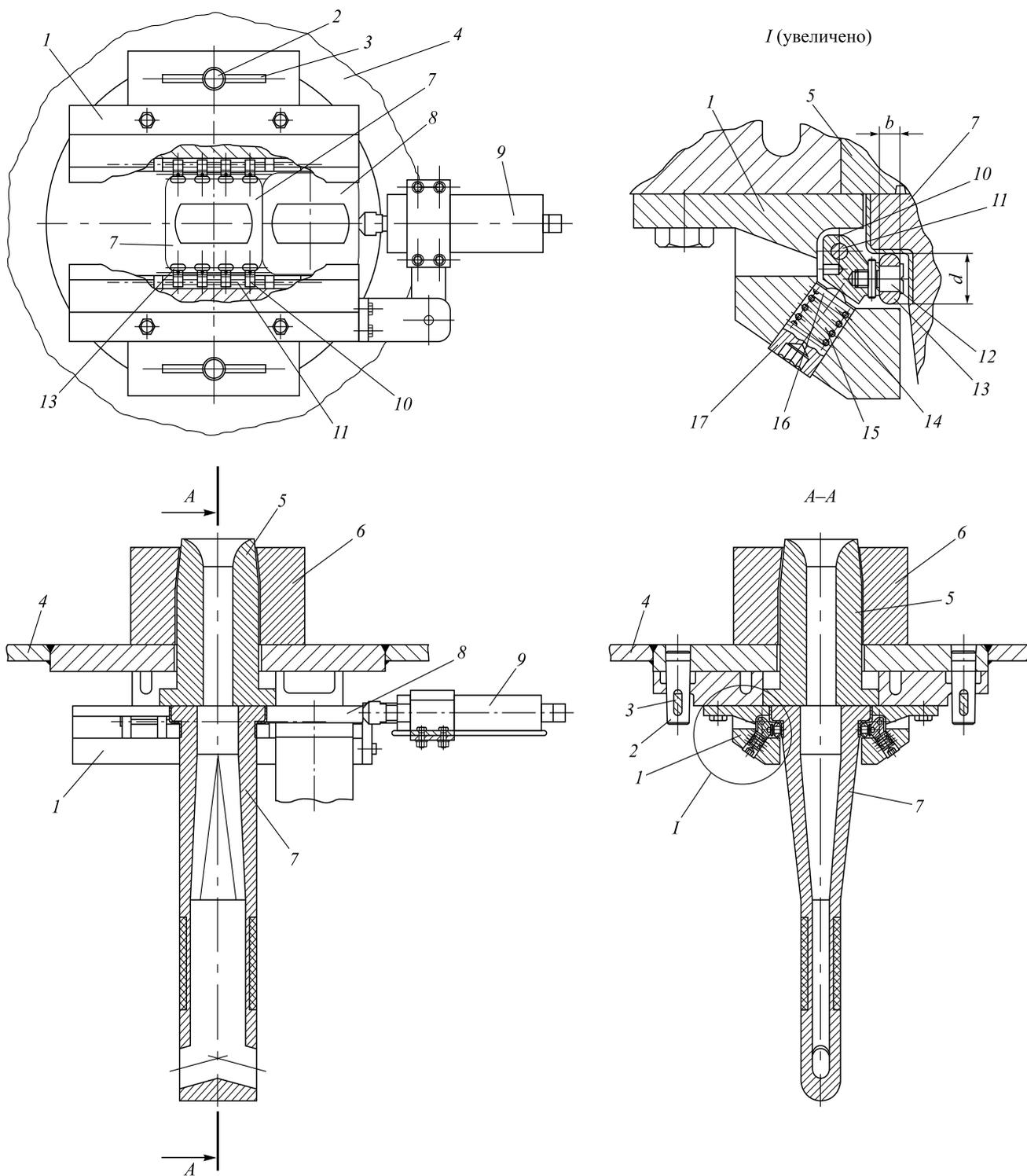


Рис. 6. Конструкция усовершенствованной системы быстрой смены погружных стаканов

Fig. 6. Design of improved system of quick change of submerged nozzles

тивное исполнение опорно-прижимного узла выгодно отличает предложенную разливочную систему от зарубежных аналогов. При ее эксплуатации снижается нагрузка на привод и интенсивность износа трущихся поверхностей, не требуется обеспечение в узких пределах жесткости применяемых пружин благодаря возможности выполнения контроля и регулирования ука-

занной характеристики без снятия устройства с ковша и последующей полной или частичной разборки, что является обязательным условием для импортных систем [15].

**Выводы.** Использование прижимных элементов, снабженных телами качения, вместо плоских насадок в опорном узле системы быстрой замены погружных ог-

неупорных стаканов промежуточных ковшей слябовых МНЛЗ позволяет:

- уменьшить на 20 – 25 % силы сопротивления, преодолеваемые ее гидравлическим приводом;
- снизить интенсивность износа трущихся металлических поверхностей и за счет этого повысить ресурс работы устройства в условиях реализации сериной разливки стали на заготовку.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов А.Н., Пилошенко В.Л., Минаев А.А. и др. Процессы непрерывной разливки. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.
2. Куклев А.В., Лейтес А.В. Практика непрерывной разливки стали. – М.: Metallurgizdat, 2011. – 432 с.
3. Аксельрод Л.М., Паршин В.М., Мазуров Е.Ф. Механизм зарастания погружных стаканов при непрерывной разливке стали // Сталь. 2007. № 4. С. 30 – 33.
4. Аксельрод Л.М., Вяткин А.А., Вяткина Н.А. и др. Предотвращение процесса затягивания канала сталеразливочного узла промежуточного ковша МНЛЗ // Новые огнеупоры. 2007. № 2. С. 9 – 14.
5. Brevet 1132163 European Patent Office. Pièce réfractaire rainurée pour coulée métallurgique, assemblage de pièces réfractaires, installation de coulée et procédé de restauration de la surface d'une pièce réfractaire / R. Jean-Luc, B. Luigi; le demandeur Vesuvius Crucible Company Wilmington (US). – № 00870038.7, date de dépôt 07.03.2000; publié 12.09.2001, Bul. № 37. – 13 p.
6. Chaudhuri J., Choudhury G., Kumar S. etc. New generation ladle slide gate system for performance improvement // MPT International. 2007. Vol. 30. Issue 6. P. 38 – 42.
7. Mutsaerts P. Submerged entry nozzle exchange system for tundishes // Millenium Steel. 2006. P. 143 – 146.
8. Chaudhuri J., Choudhury G., Kumar S. etc. Achieving higher performance & longer service life of slide plate // Iron & Steel Review. 2007. Issue June. P. 86 – 91.
9. Еронько С.П., Ошовская Е.В., Яковлев Д.А. и др. Расчет энергосиловых параметров системы быстрой замены погружных стаканов при непрерывной разливке стали // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2010. № 8. С. 30 – 35.
10. Золотухин В.И., Провоторов Д.А. Исследование устойчивости перемещаемых стаканов-дозаторов под воздействием упругих сил // Изв. ТулГУ. В 2-х томах. Т. 1. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. С. 35 – 43.
11. Дукмасов В.Г., Агеев Л.М. Состояние и развитие технологий и оборудования в мировой черной металлургии. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 187 с.
12. Смирнов Г.Ф., Бондаренко Л.М. Зависимость сопротивления движению качения и скольжения от соотношения модулей упругости при сжатии // Теория и практика металлургии. 2002. № 5 – 6. С. 72 – 75.
13. Добров И.В. К вопросу о приведенном коэффициенте трения скольжения трибосистемы // Теория и практика металлургии. 2002. № 5 – 6. С. 122 – 129.
14. Алленштейн Й. и др. Огнеупорные материалы. Структура, свойства, испытания: Справочник: Пер. с нем. / Под ред. Г. Рочка, Х. Вутнау. – М.: Интернет Инжиниринг, 2010. – 392 с.
15. Еронько С.П., Сотников А.Л., Ткачев М.Ю. Совершенствование системы быстрой смены погружных стаканов для серийной разливки стали на слябовых МНЛЗ // Металлургические процессы и оборудование. 2012. № 3. С. 26 – 38.

Поступила 3 декабря 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. No. 1, pp. 49–56.

### INVESTIGATION AND IMPROVEMENT OF THE RAPID CHANGE SYSTEM OF SUBMERGED NOZZLE OF SLAB CCM TUNDISH

**S.P. Eron'ko**, *Dr.Sci. (Eng.), Professor; Head of Chair "Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgical Plants"* (ersp@meta.ua)

**E.V. Oshovskaya**, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgical Plants"*

**M.Yu. Tkachev**, *Postgraduate of the Chair "Mechanical Equipment of Ferrous Metallurgical Plants"*

**National Technical University of Donetsk** (58, Artema str., Donetsk, 83000, Ukraine)

**Abstract.** The article describes the application prospects of rapid change systems of the submerged nozzles slab continuous casting machines of tundishes and the necessity of its further improvement to increase of reliability. The technique and results of experimental investigations of the drive power parameters of mechanism for moving of the submerged nozzles are shown. The casting system had various design of support-clamping unit for providing the conditions of slide friction and rolling friction between the supporting surface of metal holder of the protective refractory and elements that its presses. It was found that, if plane press elements in support unit are changed on the rollers, the total value of opposing coefficient of submerged nozzles displacement during its rapid change can be reduced from 0.6 – 1.3 to 0.4 – 1.0. It allows to reduce the load of the hydraulic drive of the casting system of CCM tundish in 1.2 – 1.3 times and to extend its terms of no-failure operation

in the continuous of implementation of big series casting. The obtained data can be used in calculation and design of improved rapid change system of submerged nozzles.

**Keywords:** continuous casting, submerged nozzle, delaying channel, rapid change of the nozzle, support assembly, pressing system, rolling friction, sliding friction.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-1-49-56

#### REFERENCES

1. Smirnov A.N., Pilyushenko V.L., Minaev A.A. etc. *Protsessy nepreryvnoi razlivki* [Continuous casting process]. Donetsk: DonNTU, 2002, 536 p. (In Russ.).
2. Kuklev A.V., Leites A.V. *Praktika nepreryvnoi razlivki stali* [Practice of continuous casting of steel]. Moscow: Metallurgizdat, 2011, 432 p. (In Russ.).
3. Aksel'rod L.M., Parshin V.M., Mazurov E.F. Mechanism of submersible-nozzle clogging in continuous casting of steel. *Steel in Translation*. 2007, vol. 37, no. 4, pp. 370–374.
4. Aksel'rod L.M., Vyatkin A.A., Vyatkina N.A. Prevention of the tightening process of channel of steel teeming unit of the CCM tundish. *Novye ognepory*. 2007, no. 2, pp. 9–14. (In Russ.).
5. Brevet 1132163 European Patent Office. *Pièce réfractaire rainurée pour coulée métallurgique, assemblage de pièces réfractaires, installation de coulée et procédé de restauration de la surface d'une pièce réfractaire*. R. Jean-Luc, B. Luigi; le demandeur Vesuvius Crucible Company Wilmington (US). no. 00870038.7, date de dépôt 07.03.2000; publié 12.09.2001, Bul. no. 37, 13 p.

6. Chaudhuri J., Choudhury G., Kumar S. etc. New generation ladle slide gate system for performance improvement. *MPT International*, 2007, vol. 30, Issue 6, pp. 38–42.
7. Mutsaerts P. Submerged entry nozzle exchange system for tundishes. *Millenium Steel*. 2006, pp. 143–146.
8. Chaudhuri J., Choudhury G., Kumar S. etc. Achieving higher performance & longer service life of slide plate. *Iron & Steel Review*. 2007. Issue June, pp. 86–91.
9. Eron'ko S.P., Oshovskaya E.V., Yakovlev D.A. Calculation of the energy–force parameters of the system for quick replacement of the submerged entry nozzles during continuous casting of steel. *Chernaya metallurgiya*. OAO “Chermetinformatsiya”. 2010, no. 8, pp. 30–35. (In Russ.).
10. Zolotukhin V.I., Provotorov D.A. Investigation of the stability of moved dosing cup under the influence of the elastic forces. *Izvestiya TulGU*. Part. 1. Tula. Izd-vo TulGU. 2009, pp. 35-43. (In Russ.).
11. Dukmasov V.G., Ageev L.M. *Sostoyanie i razvitie tekhnologii i oborudovaniya v mirovoi chernoi metallurgii* [Status and development of technology and equipment in the global steel industry]. Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGU, 2002, 187 p. (In Russ.).
12. Smirnov G.F., Bondarenko L.M. Dependence of the opposing to rolling and sliding motion from the ratio of compressive modulus. *Teoriya i praktika metallurgii*. 2002, no. 5–6, pp. 72–75. (In Russ.).
13. Dobrov I.V. The question of reducing the sliding friction coefficient of tribosystems. *Teoriya i praktika metallurgii*. 2002, no. 5–6, pp. 122–129. (In Russ.).
14. Allenstein Jochen u.a. *Feuerfeste Werkstoffe. Aufbau. Eigenschaften. Prüfung*. Routschka G., Wuthnow H. Hrsg. Essen, Auflage Vulkan Verlag. 2007. (Russ.ed.: Allenstein J. *Ogneupornye materialy. Struktura, svoistva, ispytaniya: spravochnik*. Routschka G., Wuthnow H. eds. Moscow: Intermet Inzhiniring, 2010, 392 p.).
15. Eron'ko S.P., Sotnikov A.L. Improvement of the rapid change system of submerged nozzles for serial casting on slab CCM. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie*. 2012, no. 3, pp. 26–38. (In Russ.).

Received December 3, 2014

УДК 621.774.352

## МКЭ – МОДЕЛИРОВАНИЕ НОВОГО СПОСОБА ПРОКАТКИ ТРУБ НА КОРОТКОЙ ОПРАВКЕ С НАТЯЖЕНИЕМ\*

**Богатов А.А.**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой

«Обработка металлов давлением» (omd@urfu.ru)

**Павлов Д.А.**, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением»

**Павлова Е.А.**, магистрант

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

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

**Аннотация.** Предложен вариант усовершенствования технологии производства труб на стане продольной прокатки. Исследования проводились на базе стана продольной прокатки труб «тандем», установленного на ТПА-140 ОАО «Синарский трубный завод». В рамках снижения себестоимости поставлена задача освоения производства всего сортамента ТПА-140 из непрерывнолитой заготовки на существующем оборудовании, а также исключение из производства катаной заготовки диаметром 120,0 мм. Для освоения непрерывнолитой заготовки необходимо увеличить коэффициент вытяжки на стане продольной прокатки труб «тандем». В настоящее время коэффициент вытяжки на стане продольной прокатки труб (СПП)-1 находится в пределах  $1,16 \div 1,5$ , а на СПП-2 –  $1,07 \div 1,15$ . Применение больших обжатий вызывает появление продольного дефекта «риска» на поверхности труб. В работе представлены результаты исследования снижения размеров лампасов труб и, как следствие, уменьшения объема брака по дефекту «риска» за счет применения кинематического натяжения в процессе раскатки на короткой оправке предварительно овализированной гильзы. Проведено исследование влияния коэффициента кинематического натяжения на формоизменение трубы в выпусках калибра при продольной прокатке с предварительной овализацией гильзы. Установлено, что кинематическое натяжение в процессе прокатки на короткой оправке предварительно овализированной гильзы позволяет снизить интенсивность утолщения стенки гильзы-трубы в выпусках калибра при прокатке в СПП-1, что уменьшает вероятность образования продольных рисков на внутренней поверхности труб. Показана возможность увеличения коэффициента вытяжки при прокатке на автоматическом стане «тандем».

**Ключевые слова:** раскатка труб, короткая оправка, автомат-стан «тандем», конечно-элементное моделирование, коэффициент овализации, коэффициент кинематического натяжения.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-57-60

На трубопрокатном агрегате ТПА-140 ОАО «Синарский трубный завод» с автомат-станом «тандем» прокатывают трубы из углеродистых и легированных марок стали ответственного назначения: бурильные, обсадные, для энергомашиностроения диаметром от 73 до 168 мм с толщиной стенки от 5 до 20 мм. В состав ТПА-140 входит автоматический стан «тандем», который состоит из двух последовательно расположенных клетей продольной прокатки СПП-1 и СПП-2 [1].

В настоящее время на ТПА-140 при производстве труб используется как катаная (диам. 120 мм), так и непрерывнолитая заготовка (диам. 150 и 156 мм). Использование непрерывнолитой заготовки является экономически более выгодным [2]. В этой связи важной целью является разработка технологии производства всего сортамента горячекатаных труб из непрерывнолитой заготовки. Для достижения поставленной цели необхо-

димо разработать технологию раскатки с повышенным коэффициентом вытяжки.

В ходе промышленных наблюдений установлено, что увеличение коэффициента вытяжки на автоматическом стане «тандем» приводит к росту объема брака труб по дефекту «риска». В настоящее время нет однозначного мнения о причинах появления продольной риски на внутренней поверхности трубы в процессе прокатки труб на автомат-стане «тандем».

В работе [3] авторы полагают, что наиболее вероятной причиной образования риски является встречное течение металла при деформации лампасов в вершинах калибра СПП-2. Кроме того было показано, что с увеличением коэффициента вытяжки и толщины стенки в выпусках калибра возрастает вероятность образования дефекта.

В ходе предшествующих исследований [4] установлено, что при использовании эджерных вертикальных валков с коэффициентом овализации 1,25 перед рабочей клетью СПП-1 удается повысить коэффициент вытяжки с 1,5 до 1,99. При этом не происходит увеличения вероятности образования дефекта «риска» на поверхности труб.

\* Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности № 11.1369.2014/К от 18.07.2014 (Номер государственной регистрации 114122470051)

Исследование поддержано программой 211 Правительства РФ, соглашение № 02.A03.21.0006

Задачей дальнейшего исследования являлось определение влияния натяжения при прокатке гильзы в СПП-1 на толщину стенки в выпусках калибра.

Исследование проводилось в программном комплексе Deform-3D. В ходе исследования, как и в работе [4], гильзе придавалась овальная форма перед прокаткой на короткой оправке с помощью эджерных валков с коэффициентом овализации 1,25, установленных перед клетью СПП-1. Для создания натяжения на выходной стороне СПП-1 были установлены эджерные валки (рис. 1), форма калибра которых соответствовала форме черновой трубы, полученной при моделировании процесса прокатки в СПП-1 с коэффициентом вытяжки 1,99 [5].

Матрица вычислительных экспериментов представлена ниже:

Номер эксперимента	1	2	3	4	5	6
Диаметр гильзы, мм				166		
Толщина стенки гильзы, мм				13		
Диаметр черновой трубы, мм				160		
Толщина стенки черновой трубы, мм				7		
Коэффициент вытяжки $\lambda$ на СПП-1	1,02	1,04	1,06	1,08	1,10	1,20

Варьируемым параметром во всех вычислительных экспериментах являлся коэффициент кинематического натяжения  $\omega$  [6, 7], который представляет собой отношение окружной скорости рабочих валков к окружной скорости вертикальных эджерных валков. Варьирование  $\omega$  осуществлялось за счет изменения окружной скорости эджерных роликов, установленных за рабочей

клетью СПП-1. По рекомендациям, данным в работах [8, 9], и с учетом практических данных о прокатке труб на автоматическом стане «тандем» температура трубы была выбрана 1200 °С, температура валков и оправки 150 °С, температура воздуха 20 °С [10]. Теплоотдача от заготовки к инструменту была задана коэффициентом теплопередачи  $\chi = 5 \text{ Вт/м}^3\cdot\text{К}$  [11].

Для уменьшения времени расчета в очагах деформации были созданы окна плотности с размером элементов 5 мм. Вне окон плотности размер элементов составлял 19 мм [11, 12]. На поверхности инструмента граничные условия были заданы следующим образом: нормальная составляющая скорости частиц металла  $V_{n|S_s} = 0$ ; закон трения задан по Зибелю  $\tau_{|S_s} = \psi\tau_s$ . Показатель напряжения трения на рабочих и эджерных валках принят равным  $\psi = 0,7$ , на оправке –  $\psi = 0,2$ . Скорость вращения валков на СПП-1 принята равной 125 об/мин [13, 14]. В качестве материала заготовки использовалась сталь AISI-1045, являющаяся аналогом российской стали 45. При постановке тепловой задачи температура заготовки принималась равной 1200 °С, а инструмента – 150 °С. Скорость перемещения толкателя принята равной 20 мм/с [15].

В каждом вычислительном эксперименте после моделирования процесса раскатки гильзы на короткой оправке производилось измерение толщины стенки в выпуске  $S_1$  и вершине  $S_2$  калибра, а затем вычислялся безразмерный параметр  $(S_1/S_2)_i$ , где  $i$  – номер вычислительного эксперимента (см. таблицу).

В вычислительном эксперименте № 6 произошло искажение геометрии трубы на выходе из эджерных валков (рис. 2), поэтому параметр  $(S_1/S_2)_i$  не измерялся.

Из таблицы и рис. 2 видно, что с увеличением коэффициента кинематического натяжения  $\omega$  происходит уменьшение безразмерного параметра  $(S_1/S_2)_i$ , т. е. уменьшается поперечная разностенность черновой трубы. Также следует отметить, что при прокатке с натяжением параметр  $(S_1/S_2)_i$  принимает меньшие значения, чем при прокатке без натяжения [4]. Таким образом, применение кинематического натяжения создает резерв для увеличения коэффициента вытяжки на СПП-1 более 1,99. Это позволит использовать непрерывнолитую заготовку для производства труб на ТПА-140.

**Результаты измерения параметра  $(S_1/S_2)_i$ , характеризующего формоизменение в выпуске калибра**

**Measured values of the parameter characterizing the deformation of the metal in the groove taper**

Номер вычислительного эксперимента	1	2	3	4	5	6
Коэффициент натяжения $\omega$	1,02	1,04	1,06	1,08	1,10	1,20
$(S_1/S_2)_i$	1,49	1,47	1,46	1,44	1,42	–

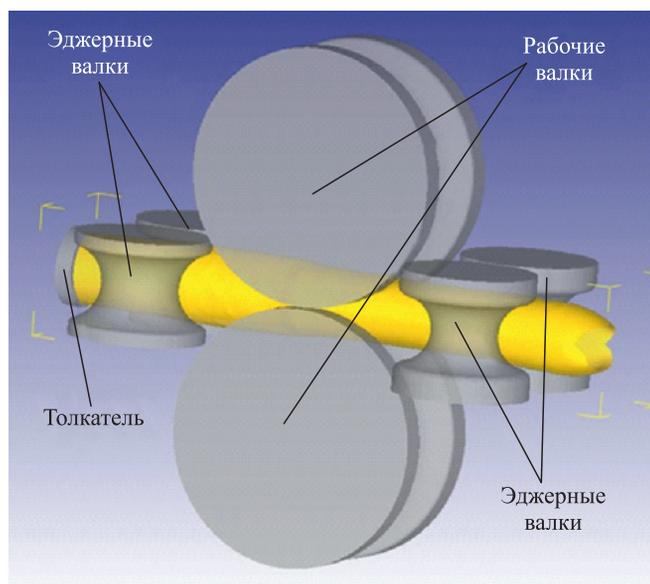


Рис. 1. 3D-модель СПП-1 с эджерными валками

Fig. 1 3D model of the lengthwise rolling mill with vertical rollers

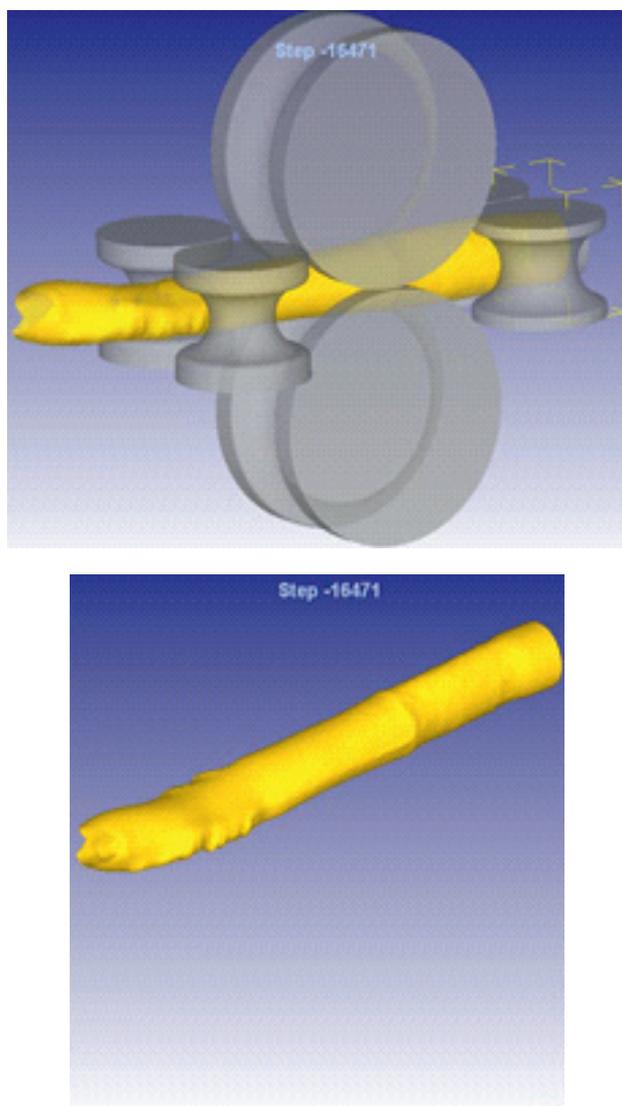


Рис. 2. Искажение геометрии трубы на выходе из эджерных валков

Fig. 2. Distortion of the tube after exit from vertical rollers

**Выводы.** В ходе исследования установлено, что кинематическое натяжение в процессе прокатки на короткой оправке предварительно овализированной гильзы позволяет уменьшить интенсивность утолщения стенки гильзы-трубы в выпусках калибра при прокатке в

СПП-1, что снижает вероятность образования продольных рисок на внутренней поверхности труб. Кроме того, при прокатке гильзы-трубы в СПП-1 с натяжением коэффициент вытяжки может быть увеличен.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Харитонов В.В., Богатов А.А., Вахрушев В.Ю. Оборудование для прокатки, прессования и волочения труб. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – 233 с.
2. Овчинников Д.В., Богатов А.А., Ерпалов М.В. Разработка и внедрение технологии производства высококачественных насосно-компрессорных труб из непрерывнолитой заготовки // Черные металлы. 2012. № 3. С. 18 – 21.
3. Богатов А.А., Павлов Д.А., Липнягов С.В., Суворов В.Н. Моделирование образования дефекта «риска» на внутренней поверхности труб при продольной прокатке // Производство проката. 2012. № 8. С. 37 – 39.
4. Богатов А. А., Дресвянкина Е.А., Павлов Д. А. Новый способ раскатки горячедеформированных труб на короткой оправке // Сталь. 2014. № 12. С. 49 – 51.
5. Данченко В.Н., Сергеев В.В., Никулин Э.В. Производство профильных труб. – М.: ИнтерметИнжиниринг, 2003. – 224 с.
6. Данченко В.Н., Коликов А.П., Романцев Б.А. Технология трубного производства. – М.: ИнтерметИнжиниринг, 2002. – 640 с.
7. Трубное производство / Б.А. Романцев, А.В. Гончарук, Н.М. Вавилкин, С.В. Самусев: Учебник. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд. дом МИСиС, 2011. – 970 с.
8. Технология и оборудование трубного производства / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 608 с.
9. Друян В.М., Гуляев Ю.Г., Чукмасов С.А. Теория и технология трубного производства – Днепропетровск: Днепр-ВАЛ, 2001. – 544 с.
10. Данилов А.Ф., Глейберг А.З., Балакин В.Г. Горячая прокатка и прессование труб. – М.: Metallurgiya, 1972. – 576 с.
11. Практическое руководство к программному комплексу Deform-3D / А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, А.И. Пугин и др. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 266 с.
12. Фокин В.Г. Метод конечных элементов в механике деформируемого твердого тела: Учеб. пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 131 с.
13. Потапов И.Н., Коликов А.П., Друян В.М. Теория трубного производства. – М.: Metallurgiya, 1991. – 424 с.
14. Шевакин Ю.Ф., Коликов А.П., Райков Ю.Н. Производство труб. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 568 с.
15. Katsumura T., Ishikawa K., Matsumoto A. etc. Development of finite element analysis model for plug mill rolling // Key Engineering Materials. 2014. Vols. 622 – 623. P. 899 – 904.

Поступила 25 февраля 2015 г.

### FEM SIMULATION OF A NEW METHOD OF LENGTHWISE PIPE ROLLING ON A STUB MANDREL WITH STRETCH

*A.A. Bogatov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Metal Forming" (omd@urfu.ru)*

*D.A. Pavlov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Metal Forming"*

*E.A. Pavlova, MA Student*

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

**Abstract.** The improvement of the pipe production technology at the lengthwise rolling mill was suggested. The investigations were carried out on the basis of the lengthwise rolling mill "tandem" installed at Open Joint-Stock Company «Sinarsky Pipe Works». There is an aim of mastering the whole gauge production of continuous casting on the existing equipment to reduce the production costs with the exclusion of diameter 120 mm rolled workpiece. The elongation ratio increase on the "tandem" lengthwise rolling mill is necessary to develop the continuous casting. At present time the elongation ratio on the length-

wise rolling mill no. 1 is between 1.16 and 1.5 and elongation ratio on lengthwise rolling mill no. 2 is between 1.07 and 1.15. The use of the increased elongation ratios on automatic mill “tandem” leads to increase of strap sizes and as result to increase of the amount of waste at a “guide mark” defect. The way to reduce the probability of the formation of a “guide mark” defect due to the kinematic tension during rolling on a stub mandrel with rough tube preovalisation was investigated. The influence of the kinematic tension on the forming tube in the groove taper at a lengthwise rolling with rough tube preovalisation was studied. The authors described the possibility of increasing the elongation ratio on the automatic mill “tandem”.

**Keywords:** tube rolling-off, stub mandrel, “tandem” mill, finite-element simulation, coefficient of rough tube ovalisation, coefficient of kinematic stretch.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-1-57-60

## REFERENCES

1. Kharitonov V.V., Bogatov A.A., Vakhrushev V.Yu. *Oborudovanie dlya prokatki, pressovaniya i volocheniya trub* [Equipment for rolling, pressing and drawing of pipes]. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2008, 233 p. (In Russ.).
2. Ovchinnikov D.V., Bogatov A.A., Erpalov M.V. Development and implementation of technology of production of high-quality pipes of continuously-cast billets. *Chernye metally*. 2012, no. 3, pp. 18–21. (In Russ.).
3. Bogatov A. A., Pavlov D. A., Lipnyagov S. V., Suvorov V. N. Simulation of “risk” defect on the inner surface of the pipes in the longitudinal rolling. *Proizvodstvo prokata*. 2012, no. 8, pp. 37–39. (In Russ.).
4. Bogatov A. A., Dresvyankina E.A., Pavlov D. A. New way of rolling of hot-deformed pipes on a short mandrel. *Stal'*. 2014, no. 12, pp. 49–51. (In Russ.).
5. Danchenko V.N., Sergeev V.V., Nikulin E.V. *Proizvodstvo profil'nykh trub* [Production of profile pipes]. Moscow: Internet Inzhniring, 2003, 224 p. (In Russ.).
6. Danchenko V.N., Kolikov A.P., Romantsev B.A. *Tekhnologiya trubnogo proizvodstva* [Technology of pipe production]. Moscow: Internetinzhniring, 2002, 640 p. (In Russ.).
7. Romantsev B.A., Goncharuk A.V., Vavilkin N.M., Samusev S.V. *Trubnoe proizvodstvo: Uchebnik* [Pipe production: Textbook]. Moscow: Izd. Dom MISiS, 2011, 970 p. (In Russ.).
8. Osadchii V.Ya., Vavilin A.S., Zimovets V.G., Kolikov A.P. *Tekhnologiya i oborudovanie trubnogo proizvodstva* [Technology and equipment for pipe production]. Moscow: Internet Inzhniring, 2001, 608 p. (In Russ.).
9. Druyan V.M., Gulyaev Yu.G., Chukmasov S.A. *Teoriya i tekhnologiya trubnogo proizvodstva* [Theory and technology of pipe production]. Dnepropetrovsk: Dnepr-VAL, 2001, 544 p. (In Russ.).
10. Danilov A.F., Gleiberg A.Z., Balakin V.G. *Goryachaya prokatka i pressovanie trub* [Hot rolling and pressing of pipes]. Moscow: Metallurgiya, 1972, 576 p. (In Russ.).
11. Karamyshev A.P., Nekrasov I.I., Pugin A.I. etc. *Prakticheskoe rukovodstvo k programnomu kompleksu Deform-3D* [Practical guide to program complex Deform-3D]. UrFU, 2010, 266 p. (In Russ.).
12. Fokin V.G. *Metod konechnykh elementov v mekhanike deformiruemogo tverdogo tela: Ucheb. posobie* [Finite element method in deformable solid mechanics: Manual]. Samara: Samar. gos. tekhn. un-t, 2010, 131 p. (In Russ.).
13. Potapov I.N., Kolikov A.P., Druyan V.M. *Teoriya trubnogo proizvodstva* [Theory of pipe production]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 424 p. (In Russ.).
14. Shevakin Yu.F., Kolikov A.P., Raikov Yu.N. *Proizvodstvo trub* [Pipe production]. Moscow: Internet Inzhniring, 2005, 568 p. (In Russ.).
15. Katsumura T., Ishikawa K., Matsumoto A., Sasaki S., Kato Y., Yanagimoto J. Development of finite element analysis model for plug mill rolling. *Key Engineering Materials*. 2014, vols. 622–623, pp. 899–904.

**Acknowledgements.** The study was made within the project part of state task in the field of scientific activity no. 11.1369.2014/K dated 18.07.2014 (state registration number: 114122470051). Supported by Act 211 of the Government of the Russian Federation, agreement no. 02.A03.21.0006.

Received February 25, 2015

УДК 338.45:669, 330.131.7, 338.28

## МЕХАНИЗМЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ИНВЕСТИРОВАНИЯ В ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЕКТЫ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

*Гончаренко Л.П., д.э.н., профессор, зав. кафедрой управления инновациями (inn.invest@mail.ru)*

*Филин С.А., д.э.н., профессор кафедры управления инновациями (safilin@mail.ru)*

*Налесная Е.Е., аспирант (ekaterinakolesnik@gmail.com)*

Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова  
(117997, Россия, Москва, Стремянный переулок, д. 36)

**Аннотация.** Предложены рекомендации по снижению уровня риска инвестирования в объекты интеллектуальной собственности (ОИС). Выявлены причины низкого уровня инвестирования металлургическими компаниями в ОИС. В работе использованы методы логического исследования, анализа, синтеза и планирования. Предложены механизмы стратегического управления рисками в инновационные проекты в металлургической отрасли. Проанализированы причины низкого уровня инвестирования металлургическими компаниями в ОИС, связанные с этим риски инвестирования и способы управления ими, а также предпосылки для возникновения тренда инновационного развития предприятий металлургической отрасли в мире и виды стратегий инновационного развития, существующие в отрасли. Приведены способы снижения уровня риска и практические примеры решения проблемы повышения привлекательности инвестирования в ОИС, применяемые предприятиями металлургической отрасли.

**Ключевые слова:** интеллектуальная собственность, НИОКР, инновационное развитие, добавленная стоимость, металлургическая отрасль, управление рисками, риски инвестирования, стратегия.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-61-65

В рейтинге «инновационности» экономик мира The Global Innovation Index 2013 Россия занимает лишь 62-е место [1], при этом ее позиция ухудшается (в GI 2012 Россия занимала 51-е место). Одними из факторов, оказывающих негативное влияние на развитие инноваций в России, являются нестабильная политическая ситуация, слабая регулятивная и институциональная среда, незначительное использование инфокоммуникационных технологий в создании новых предприятий как в основе их бизнеса, так и в их организационной структуре. Кроме того, в исследовании отмечается отсутствие стимулов у бизнеса инвестировать в инновации: в России лишь 27 % научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок (НИОКР) финансируется бизнесом, в отличие от «инновационных экономик» Японии и Республики Корея, где доля бизнеса в финансировании НИОКР около 85 % [2]. Эти факторы являются барьерами как для развития инновационной экономической модели, так и для эффективной интеграции российских компаний по всей глобальной цепочке создания стоимости и для роста производительности труда, которая в России остается достаточно низкой<sup>1</sup> [4, 5].

<sup>1</sup> В 2007 г. производительность труда в России [3] в среднем составляла 26 % от уровня США (по отдельным отраслям: 33 % – в сталелитейной отрасли, 31 % – в розничной торговле, 23 % – в розничном банковском секторе, 21 % – в жилищном строительстве и 15 % – в электроэнергетике).

Согласно данным отраслевого анализа инновационной активности, в России наибольшее число инновационно активных предприятий в 2012 г. приходилось на обрабатывающую промышленность (13,4 %) и связь (13,3 %) (рис. 1) [6].

Один из наиболее высоких уровней затрат на технологические инновации – в металлургическом производстве и производстве металлических изделий, но эти затраты осуществляются лишь сравнительно небольшим числом предприятий.

Примечательно, что для сталелитейной отрасли в России низкий уровень инвестиций в инновационные программы не означает низкой рентабельности бизнеса: уровень инвестиций в инновационные программы в 2007 – 2009 гг. среди российских металлургических компаний составлял от 0 до 0,5 % от выручки, а рентабельность по прибыли до вычета процентов и налогообложения (ЕБИТ) была ~30 %. В то же время в Японии металлургические компании инвестировали в инновационные программы до 2,5 % выручки, а их рентабельность по прибыли до вычета процентов и налогообложения (ЕБИТ) варьировалась от 0 до 10 % [7].

На сегодняшний день внутренний рынок для российских металлургических компаний является приоритетным, так как клиенты на российском рынке предлагают ценовую премию по сравнению с экспортной

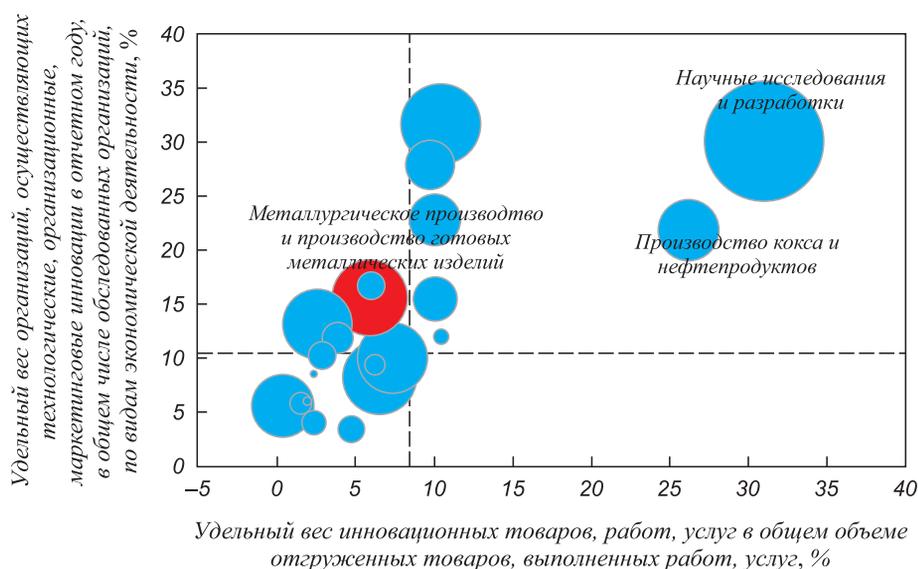


Рис. 1. Отраслевой анализ инновационной активности предприятий России в 2012 г. (размер круга представляет сумму затрат на технологические инновации в млн руб., 2012 г.)

Fig. 1. Industrial analysis of innovation activity of enterprises in Russia, 2012 (bubble size represents investments spent for innovative technologies, mln. RUR, 2012)

альтернативой (за исключением периодов значительного колебания валютного курса). Вторым традиционным рынком для российских металлургических компаний является Европа [8]. Однако темпы роста спроса как на российском, так и на европейском рынках замедляются, что создает дополнительную конкуренцию как среди российских металлургических предприятий на внутреннем рынке, так и с основными импортерами на европейском рынке.

Потребление стальной продукции в России в основном осуществляется тремя отраслями: строительство (68 %), трубная промышленность (18 %) и машиностроение (13 %, включая автомобилестроение) [3]. Примечательно, что качественно меняется спрос на российском рынке – растет спрос на продукцию с высокой добавленной стоимостью (трубы большого диаметра, качественный холоднокатаный прокат, оцинкованный и полимерный прокат). Прежде всего это связано с активным развитием инфраструктурных проектов (например, строительство газопровода «Сила Сибири», для которого требуются трубы большого диаметра, способные функционировать в экстремальных климатических условиях), а также с локализацией иностранных автопроизводителей в России, которые предъявляют более высокие требования по качеству конечной продукции и глубине ее переработки. Таким образом, российским металлургическим предприятиям, конкурирующим как на внутреннем рынке, так и на международном, несмотря на конкурентное преимущество в виде низкой себестоимости производства, необходимо выработать стратегию инвестирования в инновационные программы для создания долгосрочной и устойчивой конкурентоспособности.

Существует ряд стратегий инновационного развития отраслей, в том числе и металлургической [9].

Во-первых, стратегия лидерства в инновационном развитии, предполагающая наличие в стране развитой инфраструктуры для разработки и внедрения инновационных продуктов, доступное финансирование научно-исследовательской деятельности [10], примеры успешной коммерциализации инновационных продуктов [11].

Во-вторых, стратегия догоняющего развития, предполагающая заимствование технологий производителей из других стран. Такая стратегия позволяет снизить риски инвестирования и в некоторой степени гарантировать экономический эффект, а также сократить время от момента внедрения инновационного продукта до получения экономического эффекта от него.

Второй тип стратегии был особенно характерен для металлургической отрасли в первой половине XX в. Данная стратегия реализовывалась как обмен лучшими практиками, переманивание специалистов, преимущественно инженеров и технологов, покупкой лицензий на технологии. Такой подход был связан прежде всего со стабильностью мировой стальной отрасли, когда мощности по производству стали находились в дефиците и спрос стабильно превышал предложение, что заставляло руководство металлургических компаний использовать производственные показатели как ключевые показатели эффективности. Это приводило к процессу постоянного наращивания мощностей по всем металлургическим переделам и, в итоге, привело к тому, что мировое предложение в металлургической отрасли превысило спрос и наметился первый кризис перепроизводства. Сложившаяся ситуация обратила внимание руководства

металлургических компаний на экономические показатели эффективности, что привело к сокращению неэффективных мощностей, исключению бизнес-процессов из производства и сокращению численности сотрудников – на мировом рынке производства стали появились признаки отраслевой «дисциплины» (которая поддерживалась также государством с помощью введения защитных торговых мер и барьеров).

Однако условия переизбытка мощностей как во второй половине XX в., так и в начале XXI в., создают определенное давление на цены и возможность реализации продукции с низкой добавленной стоимостью, поэтому металлургические компании вынуждены увеличивать инвестирование в инновационные продукты. К сожалению, этот процесс сопряжен с рисками несоблюдения сроков обновления оборудования или строительства, изменения конечных производственных и качественных показателей продукции, превышения объемов необходимых инвестиций, ухудшения показателей рентабельности вследствие превышения периода выхода на полную мощность. Эти риски привели к тому, что инвестирование в ОИС является высокочрезвычайно затратным и, как следствие, непривлекательным (рис. 2) [12].

Одним из инструментов снижения этих рисков является прямое или косвенное участие государства на всех этапах разработки и продвижения на рынок инновационных продуктов [13]. Существует ряд механизмов, позволяющих создать необходимые условия для инновационного развития бизнеса [14]:

- создание условий для долгосрочного финансирования предприятий, а также снижения стоимости кредитования за счет субсидирования процентных ставок по кредитам и регионально-отраслевых кластеров для объединения предприятия в сквозные технологические циклы производства, которые будут ресурсно- и энергоэффективны на всех этапах производства;
- совершенствование амортизационной политики, которая позволила бы увеличить инвестиции в

обновление основных фондов и технологическую амортизацию и системы подготовки, переподготовки и повышения квалификации кадров для высокотехнологичных предприятий;

- использование механизмов налогового стимулирования для предприятий, осуществляющих модернизацию и развитие инновационных продуктов и технологий.

Как показывает практика, существуют альтернативные способы снижения рисков инвестирования в инновационные продукты и ОИС [15, 16]. Их могут брать на себя производители металлургического оборудования, которые, как правило, проводят исследования и участвуют в разработке инновационных продуктов и ОИС, предварительно изготавливают и тестируют необходимое оборудование на своих производственных мощностях. Благодаря возможности компьютерного моделирования технологических процессов и их результатов, а также возможности проведения технологических экспериментов в лабораториях, производители оборудования снижают стоимость НИОКР для металлургических производителей и несут большую ее часть в качестве собственных затрат.

**Выводы.** На сегодняшний день мировая металлургическая отрасль находится под давлением низкой загрузки производственных мощностей, что приводит к серьезной конкуренции среди металлургических компаний, и, следовательно, к снижению их рентабельности. Ослабевший спрос как на мировом рынке в целом, так и на отдельных региональных рынках, заставляет металлургические компании обратить внимание на процессы повышения внутренней эффективности и поиска новых продуктовых ниш. Получение премии от производства продуктов с высокой добавленной стоимостью требует дополнительного инвестирования в инновационные продукты и ОИС. Однако такие инвестиции сопряжены с рядом рисков: сложность и высокая стоимость разработок новых продуктов с высокой добавленной стоимостью; низкая рентабельность продукта

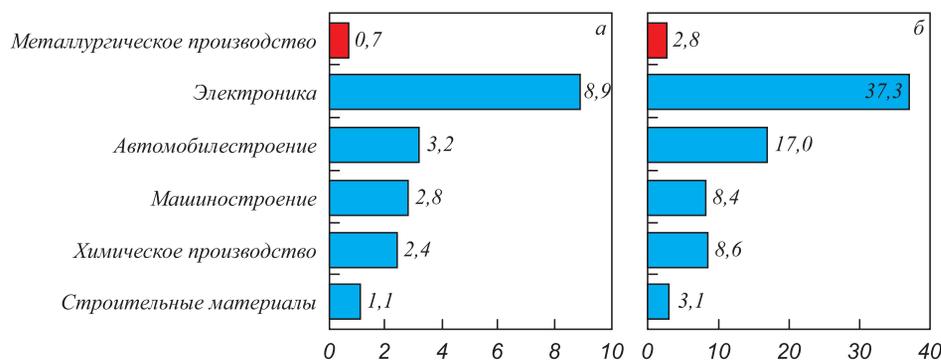


Рис. 2. Инвестиции в научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки по видам деятельности, Бостон Консалтинг Групп: а – инвестиции в НИОКР как % от выручки; б – инвестиции в НИОКР как % от валовой добавленной стоимости

Fig. 2. Investments in R&D by industries, BCG:

а – инвестиции в НИОКР как % от выручки; б – инвестиции в НИОКР как % от валовой добавленной стоимости

при значительном объеме инвестирования, а, следовательно, высокая стоимость финансирования инвестиций в инновационные продукты и ОИС; заимствование разработок конкурентами. Существует ряд механизмов, позволяющих снизить эти риски при инвестировании в инновационные продукты и ОИС: государство может использовать стимулирующие экономические инструменты в таможенной, налоговой и бюджетной политике, а также создавать необходимую инфраструктуру для снижения рисков разработки и коммерциализации инновационных продуктов. Кроме того, на практике существуют примеры совместного партнерства металлургических компаний и компаний – производителей оборудования для производства продуктов с высокой добавленной стоимостью. Подобные партнерства приводят к снижению операционных рисков инвестирования в инновационные продукты и ОИС и снижению риска переинвестирования. Однако стратегия некоторых компаний, инвестирующих в заимствование технологий производства продуктов с высокой добавленной стоимостью, приводит к уменьшению привлекательности инвестирования в инновационные продукты и ОИС компаниями – технологическими лидерами, что снижает темпы инновационного развития металлургической отрасли в целом.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cornell University, INSEAD, and WIPO (2013): The Global Innovation Index 2013: The local dynamics of innovation. – Geneva, Ithaca and Fontenbleau.
2. Pisano G.P. Creating and R&D strategy. – Cambridge: Harvard Business School, 2012.
3. Игнатенко Т., Лобада М. Стальные окна роста. Металлоснабжение и сбыт // ИД «Коммерсантъ». – М., 2013. <http://www.kommersant.ru/doc/2198152>.
4. Калинин О.И. Деловая репутация как одно из важнейших конкурентных преимуществ российских металлургов при вступлении в ВТО // Экономика в промышленности. 2012. № 2. С. 18 – 22.
5. Кулагин А. Меры защиты интересов металлургов и металлургов в условиях глобализации экономики // Металлург. 2011. № 4. С. 5.
6. Федеральная Служба Государственной Статистики. Наука, инновации и информационное общество. [http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_main/rosstat/ru/statistics/science\\_and\\_innovations/science/#](http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/science_and_innovations/science/#).
7. Namada N. Strategy on research and development at Nippon Steel Corporation. // Nippon Steel Technical Report. Chiba. 2012. № 10.
8. Презентация «День инвестора». Открытое акционерное общество «Северсталь». 2013. <http://www.severstal.com/rus/ir/cmd/index.phtml>
9. Шилов А.А. Инновационная экономика: наука, государство, бизнес // Вопросы экономики. 2011. № 1. С. 127 – 137.
10. Ревинская Л.Ю. Особенности организации денежных потоков в металлургических холдингах // Аудит и финансовый анализ. 2015. № 4. С. 207 – 211.
11. Раткин Л.С. Научно-технические разработки и инновационная продукция российских металлургов для тяжелого машиностроения РФ // Тяжелое машиностроение. 2006. № 10. С. 36 – 39.
12. Woertler M., Schuler F., Haslechner R. etc. Flexibility and Innovation. Today's imperative for steel // The BCG. – Access mode: [https://www.bcgperspectives.com/content/articles/metals\\_mining\\_sourcing\\_procurement\\_flexibility\\_innovation\\_todays\\_imperatives\\_steel/](https://www.bcgperspectives.com/content/articles/metals_mining_sourcing_procurement_flexibility_innovation_todays_imperatives_steel/)
13. Нестерова А.В. Развитие экономического механизма управления повышением инновационной активности предприятий металлургической промышленности: Дис. ... канд. экон. наук. – М., 2011.
14. Налесная Е.Е., Филин С.А. Совершенствование механизмов реализации инновационного менеджмента и развития на предприятиях металлургического производства // Материалы Международного науч.-практич. конф. «Факультет менеджмента: 70 лет организационно-управленческих инноваций»: Сб. статей. – М.: Палеотип, 2015. С. 273 – 279.
15. Налесная Е.Е. Управление рисками инвестирования в продукты интеллектуальной собственности в металлургической отрасли // Наука и практика Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. 2014. № 1. С. 52 – 58.
16. Налесная Е.Е. Стратегическое управление рисками инвестирования в объекты интеллектуальной собственности в металлургической отрасли // Вестник Института Экономики Российской Академии Наук. 2015. № 2. С. 167 – 176.

Поступила 18 января 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 1, pp. 61–65.

### APPROACHES FOR STRATEGIC RISK MANAGEMENT OF INVESTMENTS IN INNOVATIVE PROJECTS IN METALLURGICAL INDUSTRY

*L.P. Goncharenko, Dr. Sci. (Economics), Professor, Head of the Chair of Innovation Management (inn.invest@mail.ru)*

*S.A. Filin, Dr. Sci. (Economics), Professor of the Chair of Innovation Management (safilin@mail.ru)*

*E.E. Nalesnaya, Postgraduate*

(ekaterinakolesnik@gmail.com)

**Plekhanov Russian University of Economics** (36, Stremyanni lane, Moscow, 117997, Russia)

**Abstract.** The purpose of article is the offer of recommendations about decrease in risk level investment into the objects of intellectual property (OIP). The tasks solved in article consist in identification of the reasons

of low level of investment by the metallurgical companies into OIP. The analysis, synthesis and planning are used as methods of logical research. Novelty of the article is the offer of mechanisms of strategic risk management in innovative projects in metallurgical industry. The authors have analyzed the reasons of low level of investment by the metallurgical companies into OIP connected with its risks and ways of their management, and also prerequisites for emergence of a trend of innovative development of world metallurgical enterprises and types of existing innovative development strategies. The ways of risk level decrease and practical examples of problem solution of investment into OIP applied by the metallurgical enterprises are given.

**Keywords:** intellectual property, R&D, innovative development, added value, steelmaking industry, risk management, investment risk, strategy.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-1-61-65

REFERENCES

1. Cornell University, INSEAD, and WIPO (2013): *The Global Innovation Index 2013: The local dynamics of innovation*. Geneva, Ithaca and Fontenbleau.
2. Pisano G.P. *Creating and R&D strategy*. Cambridge: Harvard Business School, 2012.
3. Ignatenko T., Lobada M. Steel windows of growth. Metal sources and sales. *Elektronnyi resurs: Kommersant.ru*. 2013. Available at URL: <http://www.kommersant.ru/doc/2198152> (In Russ.).
4. Kalinskii O.I. Business reputation as one of the most important competitive advantages of Russian metallurgists at accession to WTO. *Ekonomika v promyshlennosti*. 2012, no. 2, pp. 18–22. (In Russ.).
5. Kulagin A. Measures of protection of interests of metallurgists and metalworkers in the conditions of globalization of econom. *Metalurg*. 2011, no. 4, p. 5. (In Russ.).
6. Science, innovation and information society. *Federal Service of State Statistics*. Available at URL: [http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_main/rosstat/ru/statistics/science\\_and\\_innovations/science/#](http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/science_and_innovations/science/#) (In Russ.).
7. Hamada N. Strategy on research and development at Nippon Steel Corporation. *Nippon Steel Technical Report*, no. 10, Chiba, 2012.
8. Open Joint Stock Company “Severstal”. *Prezentatsiya “Den’ investora”*: *Elektronnyi resurs*. 2013. Available at URL: <http://www.severstal.com/rus/ir/cmd/index.phtml> (In Russ.).
9. Shilov A.A. Innovative economy: science, government, business. *Voprosy ekonomiki*. 2011, no. 1, pp. 127–137. (In Russ.).
10. Revinskaya L.Yu. Features of the organization of cash flows in metallurgical holdings. *Audit i finansovyi analiz*. 2015, no. 4, pp. 207–211. (In Russ.).
11. Ratkin L.S. Science intensive design and innovative products of Russian metallurgists for heavy machinery of the Russian Federation. *Tyazheloe mashinostroenie*. 2006, no. 10, pp. 36–39. (In Russ.).
12. Woertler M., Schuler F., Haslehner R., Pichler H., Voigt N. Flexibility and Innovation. *Today’s imperative for steel: Web resource. The BCG*. Available at: [https://www.bcgperspectives.com/content/articles/metals\\_mining\\_sourcing\\_procurement\\_flexibility\\_innovation\\_todays\\_imperatives\\_steel/](https://www.bcgperspectives.com/content/articles/metals_mining_sourcing_procurement_flexibility_innovation_todays_imperatives_steel/)
13. Nesterova A.V. *Razvitie ekonomicheskogo mekhanizma upravleniya povysheniem innovatsionnoi aktivnosti predpriyatii metallurgicheskoi promyshlennosti: dis. kand. ekon. nauk*. [Development of economic mechanism for increasing of innovation activity of enterprises of metallurgical industry. Cand. Economics Sci. Diss.]. Moscow: 2011. (In Russ.).
14. Nalesnaya E.E., Filin S.A. Improving the mechanisms for the implementation of innovative management and development at metallurgical enterprises. In: *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii “Fakul’tet menedzhmenta: 70 let organizatsionno-upravlencheskikh innovatsii”*: *sbornik statei* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “The Faculty of Management: 70 years of organizational and managerial innovation”: Collection of articles]. Moscow: Paleotip, 2015, pp. 273–279. (In Russ.).
15. Nalesnaya E.E. Risk management of investment in products of intellectual property in metallurgical industry. *Nauka i praktika Rossiiskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G.V. Plekhanova*. 2014, no. 01, pp. 52–58. (In Russ.).
16. Nalesnaya E.E. Strategic risk management of investment in intellectual property in metallurgical industry. *Vestnik Instituta Ekonomiki Rossiiskoi Akademii Nauk*. 2015, no. 02, pp. 167–176. (In Russ.).

Received January 18, 2015

УДК 667.6 + 546-123

## РАЗРАБОТКА РЕЦЕПТУРЫ КОМПОЗИТНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ ГИДРОФОБНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ СКРУББЕРОВ ОБЕСПЫЛИВАНИЯ

**Чичварин А.В.**<sup>1</sup>, к.х.н., доцент, зав. лабораториями кафедры химии (ach82@mail.ru)  
**Тимофеева А.С.**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент кафедры металлургии и металловедения (uked@yandex.ru)  
**Крахт Л.Н.**<sup>1</sup>, к.т.н., профессор, заведующий кафедрой химии (kaf.himia@mail.ru)  
**Смирнов А.Н.**<sup>1</sup>, студент (smirandrey95@gmail.com)  
**Игуменова Т.И.**<sup>2</sup>, к.т.н., доцент кафедры химии и химической технологии органических соединений и переработки полимеров (igumti8@rambler.ru)

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

<sup>2</sup> Воронежский государственный университет инженерных технологий  
(394036, Россия, Воронеж, просп. Революции, 19)

**Аннотация.** Рассмотрены основные современные гидрофобные покрытия, а также возможность использования углеродных фуллеренов для получения полимеров с заданными свойствами. Приведены основные характеристики нового вида покрытия.

**Ключевые слова:** покрытие, эпоксидная смола, гидрофобность, композит, фуллерен.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-1-66-68

На сегодняшний день существует актуальная проблема создания полимеров с гидрофобными свойствами, работающими в агрессивных средах и испытывающими абразивный износ. Это, прежде всего, относится к покрытиям, применяемым для защиты скрубберов обеспыливания. Зачастую, пылевой поток образует с рабочей жидкостью скруббера агрессивную щелочную среду, вызывающую коррозию внутреннего кожуха скруббера и отдельных его элементов. В конечном счете, это приводит к образованию так называемых настывлей, затрудняющих работу и дальнейшую эксплуатацию подобных устройств. К числу наиболее применяемых покрытий относят водные растворы силиконовых полимеров и композиции на их основе. Они отличаются высокой адгезией к металлам и хорошими гидрофобными свойствами. Отрицательной стороной таких материалов является низкая устойчивость к абразивному износу при высокой концентрации пылевидных частиц [1].

Альтернативой силиконовых полимеров могут служить композиции на основе эпоксидных смол. Эпоксидные смолы стойки к действию большинства окислителей, щелочей, обладают самой высокой из перечисленных материалов адгезией к металлам. Из эпоксидных смол готовят различные клеевые и изоляционные композиции, заливочные компаунды, лакокрасочные материалы [2]. Величина краевого угла смачивания для данного класса соединений колеблется в пределах 142 – 166° в зависимости от применяемого

эпоксидно-фенольного олигомера, а критический угол скатывания для капли воды массой 0,045 г не превышает 24°. Существенным затруднением в применении данных полимеров является их низкая скорость отверждения. Один из путей решения данной проблемы – использование дополнительных отвердителей наноразмерного типа. К последним можно отнести углеродные фуллерены и фуллеренсодержащий технический углерод (ФТУ) [3].

При проведении экспериментальных и теоретических работ в качестве гидрофобизированных покрытий рассматривали три основных класса соединений, отличающихся рядом технологических параметров. В качестве полимерных покрытий для гидрофобизации поверхности скрубберов обеспыливания выбрали композиции на основе:

- силоксанолов, а именно – метилтринафтеносилоксиспан;
- органорастворимых полиакрилатов – композиция на основе стирол-акрилового сополимера Акрокам 23, Акрокам 11, в том числе допированные соединениями углерода наноразмерного типа;
- эпоксифенолов – низконаполненная композиция на основе допированного углеродными фуллеренами эпоксифенола.

В качестве наполнителя использовали фуллеренсодержащий технический углерод, состоящий на 8 % (по массе) из углеродных фуллеренов фракции C50-C92,

агломерированных на ультрадисперсном атомарном углероде [3, 4].

Поскольку процесс гидрофобизации основан на ориентированной хемосорбции на твердой поверхности молекул гидрофобизатора с образованием гидрофобных моно- или полимолекулярных слоев, то основной характеристикой качества применяемого покрытия является величина краевого угла смачивания [5]. Согласно ГОСТ 7934.2-74, краевой угол смачивания  $\theta$  или  $\cos\theta$  является характеристикой гидрофильности (гидрофобности) поверхности мембран. Величину краевого угла смачивания определяли методом прикреплённого пузырька, исходя из соотношения

$$\cos \Theta = \frac{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - h^2}{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + h^2},$$

где  $d$  – диаметр основания капли, мм;  $h$  – высота капли, мм.

Другой величиной, характеризующей гидрофобность материала, является критический угол скатывания. Скатывание капли с наклоненной твердой поверхности может начаться лишь тогда, когда работа силы тяжести, совершаемая при перемещении капли, становится равной (или большей) работе, затрачиваемой против сил адгезии ее заднего края к данной твердой поверхности. Для определения этого угла применяли прибор с консольно закрепленным на его оси наклоняемым предметным столиком. Ось и столик постепенно поворачивали со скоростью 1 град/с. На вертикальной стенке прибора против столика был закреплен угломер, позволяющий отсчитывать угол наклона столика,

который являлся искомой величиной в момент отрыва капли.

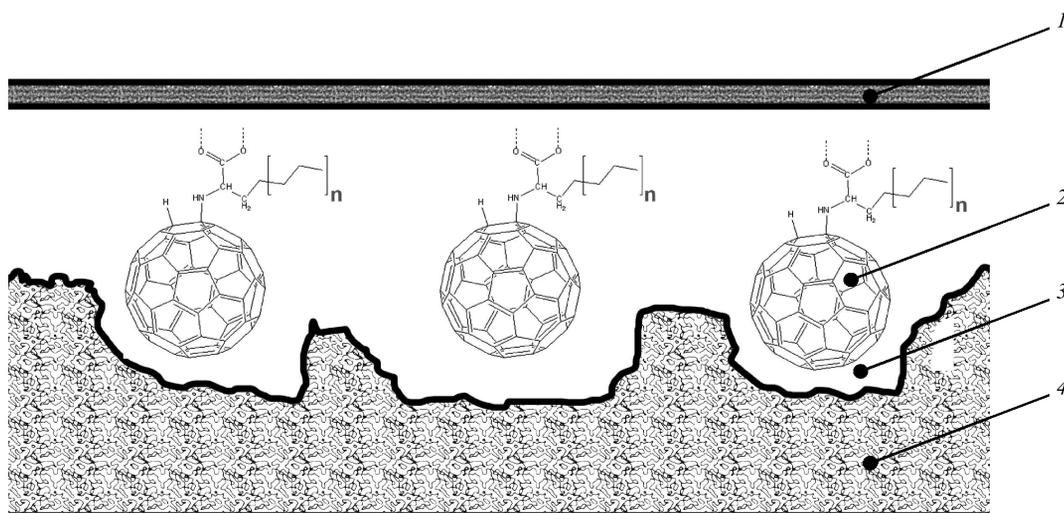
Согласно полученным данным, величина краевого угла смачивания и критического угла скатывания для анализируемых полимеров составили соответственно:

- метилтринафтеносилоксиспан – 154 и 26°;
- акрокам 11 – 146 и 20°;
- акрокам 23 – 148 и 22°;
- допированный стирол-акриловый сополимер – 148 и 22°;
- эпоксифенол – 166 и 24°;
- допированный эпоксифенол – 174 и 26°.

Полученные данные свидетельствуют о наибольшей эффективности в качестве гидрофобного покрытия в ряду исследуемых полимеров допированного фуллере-нами эпоксифенола. Механизм допирования полимерного материала углеродными фуллеренами и его способность к формированию гидрофобной поверхности можно представить в виде схемы, представленной на рисунке.

Кроме этого, допированный эпоксифенол характеризуется самой высокой адгезией среди рассмотренных полимеров, величину которой определяли по стандартной методике. Испытания на разрыв проводили при помощи разрывной машины Instron 150LX на стандартных металлических образцах размером 10×100 мм с площадью перекрытия 2 см<sup>2</sup> согласно ГОСТ 14760-69. Результаты представлены в таблице.

Таким образом, получаемый композит на основе агломератов углеродных фуллеренов обладает наибольшим краевым углом смачивания, что подтверждается проведенными исследованиями. Величина краевого угла смачивания для таких композиций достигает 168 – 186° в зависимости от допируемого полимера, а



Механизм формирования гидрофобного покрытия:

1 – гидрофобный слой; 2 – допирующий слой на основе фуллеренсодержащего композита; 3 – микропоры металлической поверхности; 4 – покрываемый материал

Formation mechanism of hydrophobic coating:

1 – hydrophobic layer; 2 – doped layer based on fullerene composite; 3 – micropores of metal surface; 4 – covered material

**Исследование адгезионной прочности рассматриваемых полимеров**

**Study of the adhesion strength of considered polymers**

Композиция	Прочность на разрыв кгс/см <sup>2</sup>
Метилтринафтеносилокспан – металл	11
Акрокам 11 – металл	37
Акрокам 23 – металл	39
Допированный стирол-акриловый сополимер – металл	44
Эпоксифенол – металл	480
Допированный эпоксифенол – металл	520

критический угол скатывания для капли воды массой 0,045 г не превышает 22°. В свою очередь, оптимальными свойствами гидрофобизирующей жидкости будут обладать полимерные составы лиофобного свойства, допированные углеродными наноматериалами типа углеродных фуллеренов. Источником последних может служить фуллеренсодержащий технический углерод, отличающийся сравнительно невысокой стоимостью, а за счет дозировки на микроуровне обуславливающий экономическую эффективность использования. Углеродные фуллерены, составляющие около 8 % от мас-

сы ФТУ, обладают рядом уникальных свойств, в числе которых способность к изменению потребительских свойств модифицируемых полимеров, таких как прочность, стойкость к окислению, эластичность, износостойкость, высокая адгезия, гидрофобность. Кроме этого, углеродные фуллерены существенно увеличивают скорость отверждения олигомерных смол на основе эпихлоргидрина и фенолов, что позволяет оптимизировать механизм их нанесения на различные поверхности.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Новосельнов А.А. Кремнийорганические гидрофобные полимерные покрытия. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2002. – 235 с.
2. Зубов П.И., Сухарева Л.А. Структура и свойства полимерных покрытий – М.: Химия, 1982. – 256 с.
3. Игуменова Т.И., Герасимов В.И., Попов Г.В., Жабин А.В. Комплексная оценка состава фуллеренсодержащего нанокремнезема // Материалы XV Междунар. науч.-практич. конф. «Резиновая промышленность. Сырье. Материалы. Технологии». – М., 2009. С. 113 – 115.
4. Крахт Л.Н., Игуменова Т.И., Чичварин А.В. О механизме взаимодействия смеси фуллеренов с макромолекулами полимеров различной структуры // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. <https://www.science-education.ru/106-7836> (дата обращения 18.04.2013).
5. Щукин Е.Д., Перцов А. В., Амелина Е. А. Коллоидная химия. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2004. – 445 с.

Поступила 3 декабря 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 1, PP. 66–68.

**DEVELOPMENT OF FORMULATIONS OF COMPOSITE NANOSTRUCTURED HYDROPHOBIC COATINGS FOR DEDUSTING SCRUBBERS**

**A.V. Chichvarin<sup>1</sup>**, *Cand. Sci. (Chem.), Assist. Professor, Head of Laboratory of the Chair of Chemistry*  
(ach82@mail.ru)

**A.S. Timofeeva<sup>1</sup>**, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallurgy and Materials”* (uked@yandex.ru)

**L.N. Krakht<sup>1</sup>**, *Cand. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Chemistry* (kaf.himia@mail.ru)

**A.N. Smirnov<sup>1</sup>**, *student* (smirandrey95@gmail.com)

**T.I. Igumenova<sup>2</sup>**, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Chemistry and Chemical Technology of Organic Compounds and Polymer Processing* (igumti8@rambler.ru)

<sup>1</sup> Stary Oskol technological Institute of National University of Science and Technology “MISiS” (42, Makarenko, Staryi Oskol, Belgorod Region, 309516, Russia)

<sup>2</sup> Voronezh State University of Engineering Technologies (19, Revolyutsii ave., Voronezh, 394036, Russia)

**Abstract.** The article describes the basic modern hydrophobic coating. The possibility of using carbon fullerenes was considered for the preparation of polymers with desired properties. The main characteristics of a new type of coating are shown.

**Keywords:** coating, epoxy, hydrophobicity, composite, fullerene.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-66-68

**REFERENCES**

1. Novosel’nov A.A. *Kremniorganicheskie gidrofobnye polimernye pokrytiya* [Organosilicone hydrophobic polymer coatings]. Moscow: RKhTU im. D.I. Mendeleeva, 2002. 235 p.
2. Zubov P.I., Sukhareva L.A. *Struktura i svoystva polimernykh pokrytii* [Structure and properties of polymer coatings]. Moscow: Khimiya, 1982. 256 p. (In Russ.).
3. Igumenova T.I., Gerasimov V.I., Popov G.V., Zhabin A.V. Complex assessment of the composition of fullerene-containing nanocarbon. In: *Materialy XV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii “Rezinovaya promyshlennost’. Syr’e. Materialy. Tekhnologii”* [Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference “Rubber industry. Raw materials. Technology”]. Moscow: 2009, pp. 113–115. (In Russ.).
4. Krakht L.N., Igumenova T.I., Chichvarin A.V. The mechanism of interaction of a mixture of fullerenes with macromolecules of polymers with different structures. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2012, no. 6, Available at URL: [www.science-education.ru/106-7836](http://www.science-education.ru/106-7836). (In Russ.).
5. Shchukin E.D., Pertsov A.V., Amelina E.A. *Kolloidnaya khimiya* [Colloidal chemistry]. Moscow: Vysshaya shkola, 2004. 445 p. (In Russ.).

Received June 04, 2015

УДК 669.017

## ФОРМИРОВАНИЕ НАНОСТРУКТУРЫ НИКЕЛИДА ТИТАНА В РЕЗУЛЬТАТЕ КВАЗИ-НЕПРЕРЫВНОЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ\*

*Хмелевская И.Ю.<sup>1</sup>, к.т.н., ведущий научный сотрудник кафедры  
обработки металлов давлением (khmel@tmo.misis.ru)*

*Кавалла Р.<sup>2</sup>, доктор-инженер, профессор, директор института обработки металлов давлением*

*Комаров В.С.<sup>1</sup>, аспирант (komarov@misis.ru)*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

<sup>2</sup>Технический университет Фрайбергская горная академия (TUBAF)  
(09599, Германия, Freiberg, Bernhard-von-Cotta-Str., 4)

**Аннотация.** Интенсивная пластическая деформация, формирующая ультрамелкозернистую структуру (наносубзеренную или нанокристаллическую), является одним из наиболее эффективных методов повышения функциональных свойств сплавов с памятью формы на основе Ti – Ni. Интенсивная пластическая деформация сплава Ti – 50,0 ат. % Ni впервые была выполнена на многоосевом деформационном модуле MaxStrain, входящем в систему Gleeble, при температурах 400, 370, 350, 330 °С. Кинетику мартенситных превращений исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии, структурные изменения изучали, используя рентгеновский дифрактометр и просвечивающую электронную микроскопию. Понижение температуры деформации с 370 до 330 °С и увеличение накопленной деформации с 4,5 до 9,5 приводит к измельчению элементов структуры и формированию смешанной наносубзеренной и нанокристаллической структур с высокой степенью дислокаций и средним размером зерна/субзерна 85 нм после максимальной деформации при наиболее низкой температуре 330 °С.

**Ключевые слова:** сплавы с памятью формы, СПФ, никелид титана, термомеханическая обработка, интенсивная пластическая деформация, ИПД, нанокристаллическая структура, MaxStrain, функциональные свойства.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-1-69-71

Структура, формирующаяся в сплавах с памятью формы (СПФ) на основе никелида титана TiNi в результате интенсивной пластической деформации (ИПД), зависит от применяемой схемы деформации и режимов термомеханической обработки (ТМО) [1, 2]. В работах [3, 4] для получения наносубзеренной (НСС), нанокристаллической (НКС) и смешанной (НСС + НКС) структур в СПФ Ti – Ni была использована ТМО, включавшая холодную прокатку с деформацией от 0,3 до 1,9 и последеформационный отжиг при 300 – 400 °С. В результате формирования НКС с оптимальным размером зерен (65 ± 15 нм) на сплаве Ti – 50,0 ат. % Ni удалось достигнуть рекордных значений реактивного напряжения (1420 МПа) и полностью обратимой деформации (8 %). Наиболее высокий комплекс усталостных функциональных свойств в условиях термомеханического и сверхупругого циклирования был получен в случае формирования смешанной НС + НК структуры [5].

Указанные результаты были получены в прокатанной проволоке сечением менее 1 мм<sup>2</sup>. В то же время задача получения объемных наноструктурных СПФ

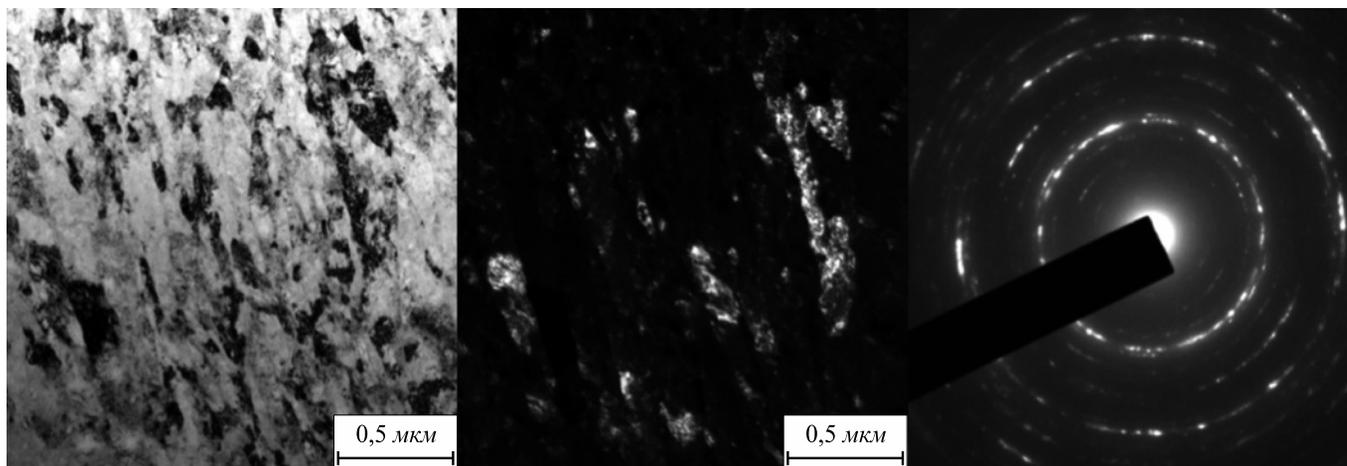
Ti–Ni оставалась нерешенной, поскольку для этого требуется обеспечить непрерывную изотермическую деформацию при 300 – 400 °С [6].

В настоящей работе с целью получения наноструктуры в объемных образцах СПФ Ti–Ni использовали деформационный модуль MaxStrain (MS) в составе комплекса Gleeble 3500, на котором осуществляли квази-непрерывную многоосевую изотермическую деформацию образцов размером 10×10×10 мм<sup>3</sup> в интервале 400 – 330 °С. Накопленная деформация составляла 4,6 – 9,5.

Электронномикроскопическое исследование (JEM 2100) выявило после MS по всем режимам смешанную структуру, состоящую из зерен и субзерен, которым отвечают соответственно разбросанные по кольцу точечные рефлексы и дискретные или непрерывные дуговые рефлексы (см. рисунок).

Понижение температуры деформации до 330 °С с одновременным увеличением степени деформации до 9,5 привело к уменьшению размера зерен/субзерен по нормали к плоскости последнего обжатия с 160 до 85 нм. Получение смешанной НК + НС структуры сплава Ti – 50,0 % Ni обещает в перспективе существенное повышение комплекса его функциональных свойств в объемных образцах.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI57514X0094).



Структура сплава Ti – 50,0 % Ni, подвергнутого MS-деформации (9,5) при 330 °С.

Просвечивающая электронная микроскопия, слева направо: светлопольное, темнопольное изображения и дифракционная картина

Structure of Ti – 50.0 % Ni alloy after MS-deformation (9.5) at 330 °C.

Transmission electron microscopy, from left to right: bright field, dark-field images and the diffraction pattern

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shape memory alloys: fundamentals, modeling and applications / V. Brailovski, S. Prokoshkin, P. Terriault, F. Trochu. – Montreal: ETS Publ., 2003. – 851 p.
2. Resnina N., Rubanik V. (Eds). Shape memory alloys: properties, technologies, opportunities. – Zurich: TransTech Publications, 2015. – 640 p.
3. Brailovski V., Prokoshkin S., Khmelevskaya I. etc. Structure and properties of the Ti – 50.0 at. % Ni alloy after strain hardening and nanocrystallizing thermomechanical processing // Materials Transactions. 2006. Vol. 47. P. 795 – 804.
4. Prokoshkin S., Brailovski V., Inaekyan K. etc. Structure and properties of severely cold-rolled and annealed Ti – Ni shape memory alloys // Mater. Sci. Eng.A. 2008. Vol. 481 – 482. P. 114 – 118.
5. Brailovski V., Prokoshkin S., Inaekyan K., Demers V. Functional properties of nanocrystalline, submicrocrystalline and polygonized Ti–Ni alloys processed by cold rolling and post-deformation annealing // Journal of Alloys and Compounds. 2011. Vol. 509. No. 5. P. 2066 – 2075.
6. Prokoshkin S.D., Khmelevskaya I. Yu., Dobatkin S.V. etc. Alloy composition, deformation temperature, pressure and post-deformation annealing effects in severely deformed Ti – Ni based shape memory alloys // Acta Materialia. 2005. Vol. 53. P. 2703 – 2714.

Поступила 12 ноября 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2016. VOL. 59. NO. 1, pp. 69–71.

### FORMATION OF NANOSTRUCTURE IN TITANIUM NICKELIDE AS A RESULT OF QUASI-CONTINUOUS ISOTHERMAL DEFORMATION

**I.Yu. Khmelevskaya**<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Chair “Metal Forming” (khmel@tmo.misis.ru)

**R. Kavalla**<sup>2</sup>, Director of Metalforming Institute, Dr. Sci. (Eng.), Professor

**V.S. Komarov**<sup>1</sup>, Postgraduate (komarov@misis.ru)

<sup>1</sup> National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS) (4, Leninskii ave., Moscow, 119049, Russia)

<sup>2</sup> Technische Universität Bergakademie Freiberg (Deutschland, Bernhard-von-Cotta-Str., 4, 09599, Freiberg)

from 4.5 to 9.5 leads to a refinement of the structural elements and formation of mixed nanosubgraine and nanocrystalline structure with high dislocation density and average grain/subgrain size of 85 nm after deformation at the lowest temperature 330 °C with the highest strain.

**Keywords:** shape memory alloys, SMA, titanium nickelide, thermomechanical treatment, severe plastic deformation, severe plastic deformation (SPD), nanocrystalline structure, MaxStrain, functional properties.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-1-69-71

#### REFERENCES

1. Brailovski V., Prokoshkin S., Terriault P., Trochu F. *Shape memory alloys: fundamentals, modeling and applications*. ETS Publ., Montreal, 2003, 851 p.
2. Resnina N., Rubanik V. (Eds). *Shape memory alloys: properties, technologies, opportunities*. Trans Tech Publications, Zurich, 2015, 640 p.
3. Brailovski V., Prokoshkin S., Khmelevskaya I. et al. Structure and properties of the Ti – 50.0 at. % Ni alloy after strain hardening and

nanocrystallizing thermomechanical processing. *Materials Transactions*, 2006, vol. 47, pp. 795–804.

4. Prokoshkin S., Brailovski V., Inaekyan K. et al. Structure and properties of severely cold-rolled and annealed Ti–Ni shape memory alloys. *Mater. Sci. Eng. A*, 2008, vol. 481–482, pp. 114–118.
5. Brailovski V., Prokoshkin S., Inaekyan K., Demers V. Functional properties of nanocrystalline, submicrocrystalline and polygonized Ti–Ni alloys processed by cold rolling and post-deformation annealing. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, vol. 509, no. 5, pp. 2066–2075.

6. Prokoshkin S.D., Khmelevskaya I.Yu., Dobatkin S.V. et al. Alloy composition, deformation temperature, pressure and post-deformation annealing effects in severely deformed Ti–Ni based shape memory alloys. *Acta Materialia*, 2005, vol. 53, pp. 2703–2714.

**Acknowledgements.** The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (the unique identifier of the project RFMEFI57514X0094).

Received November 12, 2015

---

Над номером работали:

Леонтьев Л.И., *главный редактор*

Полулях Л.А., *ответственный секретарь*

Ивани Е.А., *заместитель главного редактора*

Потапова Е.Ю., *заместитель главного редактора по развитию*

Долицкая О.А., *научный редактор*

Расенец В.В., *верстка, иллюстрации*

Кузнецов А.А., *системный администратор*

Острогорская Г.Ю., *менеджер по работе с клиентами*

---

Подписано в печать 26.01.2016. Формат 60×90 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бум. офсетная № 1.  
Печать цифровая. Усл. печ. л. 9,0. Заказ 4944. Цена свободная.

---

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