

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

# ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

---

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

---

№ 9, 2015

Издается с января 1958 г. ежемесячно

Том 58

---

# ИЗВЕСТИЯ

## ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

### ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

**Главный редактор:** **ЮСФИН Ю.С.**

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

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

(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

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

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

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

(Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)

#### Члены редакционной коллегии:

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

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

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

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

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

**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

---

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

(National Research Technological University "MISIS", Moscow)

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

(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

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

(National Research Technological University "MISIS", Moscow)

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

(Siberian State Industrial University, Novokuznetsk)

---

### Editorial board:

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

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

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

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

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

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)

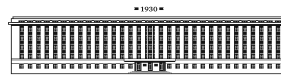
YUR'EV A.B. (OJSC "EVRAZ WSMP", Novokuznetsk)

---

### 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@sisis.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

|                                                                                                                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Мальцев В.А., Набойченко С.С., Ярошенко Ю.Г. Ученые и педагоги, их творчество – научная и техническая база наших достижений (к 95-летию металлургического образования на Среднем Урале) ..... | 617 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

### РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

|                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Лисиенко В.Г., Лаптева А.В., Чесноков Ю.Н., Луговкин В.В. Сравнительная эмиссия парникового газа CO <sub>2</sub> в пределах черной металлургии ..... | 625 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

### МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

|                                                                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Гордон Я.М., Кумар С., Фрейслих М., Ярошенко Ю.Г. Современные технологии производства железа и стали и возможные пути их развития .....                                       | 630 |
| Бурмасов С.П., Гудов А.Г., Ярошенко Ю.Г., Мелинг В.В., Дресвянкина Л.Е. Анализ массообменных процессов при ковшем рафинировании стали в условиях газового перемешивания ..... | 638 |
| Воронов Г.В., Гольцев В.А., Глухов И.В. Особенности аэродинамики и температурного поля в рабочем пространстве современной дуговой сталеплавильной печи .....                  | 645 |
| Матюхин В.И., Меламуд С.Г., Шацилло В.В., Матюхин О.В., Матюхина А.В. Исследование особенностей обжига мелких фракций сидерита во вращающейся печи .....                      | 652 |
| Филатов С.В., Загайнов С.А., Гилева Л.Ю., Пыхтеева К.Б. Разработка методики анализа процессов восстановления оксидов железа .....                                             | 658 |

### ИНЖИНИРИНГ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

|                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Зайнуллин Л.А., Калганов М.В., Калганов Д.В., Ярчук В.Ф. Исследование эффективности охлаждения вращающегося вала печного высокотемпературного вентилятора ..... | 662 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Казяев М.Д., Вохмяков А.В., Киселев Е.В., Спитченко Д.И. Методика и результаты исследования сложного внешнего теплообмена в вертикальной камерной печи для термообработки длинномерных изделий ..... | 667 |
| Ярошенко Ю.Г., Швыдкий В.С., Спириин Н.А., Лавров В.В., Носков В.Ю. Нестационарный теплообмен в зоне расплава и особенности переходных процессов в доменной печи .....                               | 672 |

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

|                                                                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Гервасьев М.А., Юровских А.С., Беликов С.В., Маслова О.В., Жилин А.С. Влияние Al и Si на образование аустенита в межкритическом интервале температур в Cr–Ni–Mo-стали ..... | 677 |
| Захарченко М.В., Жиликов А.Ю., Липунов Ю.И., Эйсмонт К.Ю., Ярошенко Ю.Г. Влияние технологии термоупрочнения на микроструктуру рельсовой накладки .....                      | 682 |
| Юрьев Б.П., Гольцев В.А., Луговкин В.В., Ярчук В.Ф. Сравнительный анализ описания гидравлического сопротивления плотного слоя из частиц разной формы .....                  | 688 |

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

|                                                                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Казяев М.Д., Самойлович Ю.А., Палеев В.С. Математическое моделирование напряженного состояния в рабочих валках холодной прокатки при ускоренном нагреве в камерной печи .. | 696 |
| Лавров В.В., Спириин Н.А., Бурьякин А.А., Щипанов К.А., Рыболов В.Ю. Разработка программного обеспечения в АСУП доменного цеха .....                                       | 703 |
| Шилов В.А., Куделин С.П., Инатович Ю.В., Бондин А.Р. Экспертная система технологии сортовой прокатки .....                                                                 | 710 |

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. VOL. 58. NO. 9

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Mal'tsev V.A., Naboichenko S.S., Yaroshenko Yu.G. Scientists and educators, their creativity – scientific and technical basis of our achievements (to the 95th anniversary of metallurgical education in the Middle Urals) ..... | 617 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

### RESOURCES SAVING IN FERROUS METALLURGY

|                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Lisienko V.G., Lapteva A.V., Chesnokov Yu.N., Lugovkin V.V. Comparative emission of greenhouse gas CO <sub>2</sub> in the processing of ferrous metallurgy ..... | 625 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

### METALLURGICAL TECHNOLOGIES

|                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gordon Y., Kumar S., Freislich M., Yaroshenko Y. The modern technology of iron and steel production and possible ways of their development .....                         | 630 |
| Burmasov S.P., Gudov A.G., Yaroshenko Yu.G., Meling V.V., Dresvyankina L.E. The analysis of mass transfer in conditions of gas stirring at ladle refining of steel ..... | 638 |
| Voronov G.V., Gol'tsev V.A., Glukhov I.V. Aerodynamics and temperature field features in the modern EAF workspace .....                                                  | 645 |
| Matyukhin V.I., Melamud S.G., Shatsillo V.V., Matyukhin O.V., Matyukhina A.V. The investigation of firing of siderite small fractions in a rotary furnace .....          | 652 |
| Filatov S.V., Zagainov S.A., Gileva L.Yu., Pykhteeva K.B. Development of the analysis of iron oxide reduction processes .....                                            | 658 |

### ENGINEERING IN FERROUS METALLURGY

|                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Zainullin L.A., Kalganov M.V., Kalganov D.V., Yarchuk V.F. Investigation of cooling efficiency of the rotating high temperature furnace fan ..... | 662 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Kazyayev M.D., Vokhmyakov A.V., Kiselev E.V., Spitchenko D.I. Complicated external heat exchange in the vertical chamber furnace designed for heat treatment of long products ..... | 667 |
| Yaroshenko Yu.G., Shvydkii V.S., Spirin N.A., Lavrov V.V., Noskov V.Yu. Displaceable heat exchange in the smelting zone and features of transients in blast furnace .....           | 672 |

### MATERIAL SCIENCE AND NANOTECHNOLOGIES

|                                                                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gervas'ev M.A., Yurovskikh A.S., Belikov S.V., Maslova O.V., Zhilin A.S. Effect of Al and Si on the formation of austenite in intercritical temperature range in Cr–Ni–Mo-steel ..... | 677 |
| Zakharchenko M.V., Zhilyakov A.Yu., Lipunov Yu.I., Eismondt K.Yu., Yaroshenko Yu.G. Influence of the quenching technologies on the joint bar microstructure .....                     | 682 |
| Yur'ev B.P., Gol'tsev V.A., Lugovkin V.V., Yarchuk V.F. Comparative analysis of the hydraulic resistance descriptions in a dense layer of different shape particles .....             | 688 |

### INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

|                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Kazyayev M.D., Samoilovich Yu.A., Paleev V.S. Mathematical modeling of the thermo-stressed condition in the cold work rolls during fast heating in the chamber furnace ..... | 696 |
| Lavrov V.V., Spirin N.A., Burykin A.A., Shchipanov K.A., Rybolovlev V.Y. Development of the CAM system software at blast furnace plant .....                                 | 703 |
| Shilov V.A., Kudelin S.P., Inatovich Yu.V., Bondin A.R. Expert system of bar rolling technology .....                                                                        | 710 |

УДК 669.091

## УЧЕНЫЕ И ПЕДАГОГИ, ИХ ТВОРЧЕСТВО – НАУЧНАЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА НАШИХ ДОСТИЖЕНИЙ (К 95-ЛЕТИЮ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ НА СРЕДНЕМ УРАЛЕ)

*Мальцев В.А., д.т.н., профессор, директор Института материаловедения  
и металлургии (immt@urfu.ru)*

*Набойченко С.С. чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор, зав. кафедрой  
«Металлургия тяжелых цветных металлов»*

*Ярошенко Ю.Г., д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»*

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

**Аннотация.** Высшее образование на Среднем Урале было учреждено по декрету В.И. Ленина 19 октября 1920 г. В структуре Уральского университета был предусмотрен Политехнический институт с химико-металлургическим факультетом. Организаторами учебного процесса на металлургическом отделении были видные русские ученые и руководители металлургических заводов Урала: В.Е. Грум-Гржимайло, И.А. Соколов, Б.П. Сергиевский, А.Ф. Головин, С.С. Штейнберг. Последовательно рассмотрена деятельность коллектива преподавателей в период индустриализации страны, во время Великой Отечественной войны, в послевоенное время и после создания Института материаловедения и металлургии в составе Уральского федерального университета имени первого Президента Б.Н. Ельцина.

**Ключевые слова:** университет, институт, факультет, кафедра, учебный процесс, ученые, преподаватели, результаты деятельности.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-617-624

Создание Уральского государственного университета связано с именем В.И. Ленина. В 1918 г. он предложил своим коллегам по Совету народных комиссаров рассмотреть вопрос о необходимости организации на Урале подготовки инженерных кадров. Однако решение не было принято из-за начала Гражданской войны. Только в начале 1920 г. после обращения руководства Екатеринбургской губернии в Народный комиссариат просвещения и поддержки этого обращения научной общественностью Москвы и Петрограда Наркомпрос принял специальное решение, в котором было записано: «считать безусловно необходимым основание в Екатеринбурге Уральского государственного университета». Ознакомившись с первым вариантом проекта, В.И. Ленин заметил, что в нем не говорится о технической силе и горной жизни Урала и уже 19 октября 1920 г. был представлен проект документа, в котором были учтены не только его замечания, но и замечания членов комиссии, в частности Б.В. Дидковского – будущего ректора университета [1]. В этот же день был подписан исторический для Урала декрет об учреждении в Екатеринбурге Уральского государственного университета.

Металлургический факультет первое время входил в состав Горного института. Однако в том же учебном году был переведен в политехнический институт. Всего в 1920/21 учебном году на металлургический факультет на все четыре курса было зачислено 156 студентов. Профессорско-преподавательский состав факультета

состоял из четырех профессоров, восьми преподавателей и одного лаборанта.

Трудности организации учебного процесса в университете были огромными [2]. Они касались и приема студентов, и привлечения преподавателей, и создания учебных лабораторий, аудиторий, библиотечного фонда. Особенно трудно было с аудиторным фондом. Государство выделило университету помещения бывшего Епархиального женского училища, Тихвинского монастыря и дом бывшего начальника Уральских заводов. Однако одно из этих помещений заняли воинские части. В.И. Ленин, узнав об этом, направил 17 декабря 1920 г. местным властям распоряжение: «приказываю немедленно освободить отведенное помещение Уральскому университету и предписываю впредь не нарушать самовольно работу университета, с предупреждением о предании суду виновных». Этого было достаточно, чтобы помещение было немедленно возвращено.

Но «прежде чем начинать учебу нам (студентам – авт.) пришлось разламывать нары, выносить мусор, мыть полы и стены, а потом примитивно оборудовать аудитории. Много, например, классные доски, скамейки и прочее делали мы сами. Естественно учеба в этом году началась позже обычного, причем студентам пришлось сидеть на самодельных скамейках в шинелях (или полушубках) в холодных аудиториях (здание не отапливалось) и писать, держа тетради на коленях (столов не хватало, а парт и в помине не было). В этом году

резко возросло число учащихся (вернулись из армии ранее мобилизованные студенты), а также значительно пополнился преподавательский состав». Эти строки принадлежат Алексею Алексеевичу Сигову – одному из первых выпускников металлургического факультета.

Структура будущего Института материаловедения и металлургии Уральского федерального университета оформилась не сразу.

Первой кафедрой на металлургическом отделении химико-технологического факультета УПИ, созданной в 1920 г., была кафедра «Металлургия стали и теория печей» [3]. Ее организовал великий русский металлург В.Е. Грум-Гржимайло – инженер, ученый, педагог. Он 22 года жизни отдал работе на уральских металлургических заводах: в Нижнем Тагиле им была построена доменная печь, работавшая на горячем дутье, в Нижней Салде он руководил проектом и строительством рельсобалочного стана. Будучи управляющим Алапаевского горного округа, он много внимания уделял совершенствованию металлургических технологий. Как ученый В.Е. Грум-Гржимайло создал гидравлическую теорию металлургических печей, теоретически обосновал технологию русского бессемерования, сформулировал правило калибровки валков, носящее его имя, раскрыл причины роста динаса. Как педагог Владимир Ефимович, профессор Санкт-Петербургского политехнического института, написал конспект лекций «Металлургия стали», впоследствии доработанный в учебник такого же названия, по двум изданиям которого учились студенты и в 30-е годы прошлого столетия.

Вторая кафедра – «Теория металлургических процессов и металлургия чугуна» была организована в 1921 г. И.А. Соколовым – уникальным человеком, закончившим

в 1891 г. физмат Санкт-Петербургского университета и после работы в гимназиях, учебы в Горном институте в Санкт-Петербурге (1898 – 1904 гг.) стал горным инженером по специальности металлургия [4, 5]. Его инженерная деятельность началась на Урале в Алапаевске, где В.Е. Грум-Гржимайло создал для начинающего специалиста идеальные условия для инженерной и научной деятельности. Все свои знания металлург И.А. Соколов посвятил созданию и развитию теории и практике доменного производства. Сочетание университетского математического образования с инженерным металлургическим принесло свои плоды. Результаты первого его исследования были обобщены в монографии «О восстановимости железных руд». Этот капитальный труд специалистами был признан классическим: он выдержал четыре издания в России, СССР и Швеции.

В 1921 г. была также основана кафедра металлургии цветных и благородных металлов. Ее организатором и заведующим стал Николай Николаевич Барабошкин – выпускник 1914 г. Санкт-Петербургского горного института [4, 5]. Во время учебы в институте он создал лаборатории и разработал методики оценки руд благородных металлов. Став инженером, он принимал участие в проектировании и строительстве обогатительных фабрик, исследовал руды цветных металлов и разрабатывал технологии их переработки. Н.Н. Барабошкин является одним из организаторов аффинажного производства в России. С таким багажом знаний и опыта он был приглашен на работу в Политехнический институт Уральского университета и стал первым деканом металлургического факультета в 1920 г. Под его руководством разработаны оригинальные методы получения всех шести благородных металлов высокой чис-



Рис. 1. Владимир Ефимович Грум-Гржимайло

Fig. 1. Vladimir Efimovich Grum-Grzhimailo



Рис. 2. Николай Николаевич Барабошкин

Fig. 2. Nikolai Nikolaevich Baraboshkin

тоты платиновой группы. Им создан для обучения студентов-металлургов курс «Физико-химические основы производства цветных металлов», организована аспирантура. Современники Н.Н. Барабошкина высоко ценили его знания и опыт как учителя, экспериментатора, организатора и руководителя не только в СССР, но и за рубежом. Его неоднократно избирали председателем Научно-технического общества цветной металлургии. Он состоял членом Американского и Германского химических обществ, Американского электрохимического общества, Американского института горных инженеров, Лондонского института металлов.

Кафедра «Литейное производство» была организована по инициативе профессора В.Е. Грум-Гржимайло в 1922 г. [4, 5] главным металлургом Верх-Исетского завода (ВИЗ) Борисом Павловичем Сергиевским, который по приглашению профессора с 1920 г. как преподаватель по совместительству и начальник мартеновского цеха ВИЗа знакомил студентов с тайнами литейного дела. За время работы заведующим кафедрой (1922 – 1934 гг.) и профессором кафедры (1936 – 1941 гг.) он сумел наладить тесные связи со многими заводами и проектными организациями Урала: Уральским заводом тяжелого машиностроения, Челябинским тракторным заводом, Уралгипрометом, Гипромашем и др. Основное внимание в своей работе на кафедре Б.П. Сергиевский уделял созданию учебных лабораторий и разработке учебно-методического обеспечения. Прекрасный педагог, владеющий немецким и французскими языками, он блестяще читал лекции. При подготовке лекционных курсов как по специальным, так и по теплотехническим дисциплинам, он использовал достижения и опыт отечественной науки и техники.

Кафедра прокатки, в будущем кафедра «Обработки металлов давлением», создана 1923 г. [4, 5]. Заведующим кафедрой был приглашен Аким Филиппович Головин – выпускник 1909 г. Санкт-Петербургского горного института. Параллельно с чтением лекций по спецкурсу, он работал над созданием теории формоизменения металла при прокатке, непрерывно совершенствуя отдельные ее положения и выводы. На лекциях студенты от него часто слышали: «Зачеркните то, что я сообщил вам в прошлый раз, и сделайте новый вывод». Материалы исследований им обобщены в трех томах: «Теория пластической деформации», «Теория продольной прокатки», «Калибровка». Как основатель Уральской научной школы прокатчиков, А.Ф. Головин воспитал плеяду учеников, которые распространили и развили научные идеи своего учителя, создали кафедры прокатки, а также «Машины и технологии обработки металлов давлением» в Челябинске, Новокузнецке или возглавили родственные кафедры в других вузах и лаборатории в отраслевых научно-исследовательских институтах страны. Творческая работа А.Ф. Головина заслуженно отмечена высокой наградой – орденом Ленина, Почетным званием – Заслуженный деятель науки и техники РСФСР.

А.Ф. Головин дважды был избран депутатом Верховного совета РСФСР. В 1946 г. он, как старейший депутат, открывал первое заседание сессии Верховного Совета.

Кафедра металловедения и термической обработки металлов была основана в 1925 г. [4, 5] Сергеем Самойловичем Штейнбергом, получившим высшее образование в Горной академии в Германии (г. Фрейберг). Его работа мастером мартеновского цеха в Юрюзани, заведующим металлографической лабораторией Пермских пушечных заводов, главным металлургом треста «Уралмет» в Златоусте сформировала его как исследователя и ученого. Профессор (1927 г.), доктор технических наук (1934 г.), член-корр. АН СССР (1939 г.) С.С. Штейнберг подготовил трехтомный учебник по металловедению, выдержавший три издания, долгое время служивший основным учебником при подготовке инженеров термистов. Организуя работу кафедры, С.С. Штейнберг не прерывал творческие связи с Уральским филиалом АН СССР, Уральским институтом черных металлов. Им разработана теория превращения аустенита в углеродистых и легированных сталях. Под его руководством был налажен процесс производства ферросплавов на Урале, внедрен метод изготовления высокопрочной проволоки, усовершенствованы способы производства высококачественных сталей на уральских заводах. Воспитанные им ученики, став талантливыми специалистами, к концу тридцатых годов сформировали Уральскую школу металловедов.

В первые годы развития металлургического факультета Политехнического института студенческие группы были малочисленны. Поэтому инженерами-металлургами становились единицы. Первым выпускником металлургического отделения химико-металлургического факультета 12 марта 1924 г. стал Николай Грум-Гржимайло, видный металловед, профессор, доктор технических наук. В 1925 – 1927 гг. стали инженерами [6, 7]: О.А. Есин – основоположник сравнительно молодой теории металлургических процессов, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор, доктор технических наук, лауреат Государственной премии СССР; В.В. Михайлов – основоположник Уральской школы металлургов в области комплексного использования железорудного сырья, профессор, доктор технических наук, лауреат Сталинской премии СССР, академик АН Казахской ССР; А.А. Горшков – руководитель работ по совершенствованию технологий чугунного литья и производства чугуна в вагранках, профессор, доктор технических наук, лауреат Сталинской премии СССР, засл. деятель науки и техники Украинской ССР, член-корр. АН УССР; А.А. Сигов – руководитель работ по совершенствованию технологий агломерационных процессов, один из авторов технологии выплавки углеродистого феррохрома в доменных печах, профессор, доктор технических наук, лауреат Сталинской премии СССР; Д.В. Будрин – основоположник современной теории нагрева, профессор; М.А. Глинков – один из

основателей металлургической теплотехники, внес вклад в создание общей теории печей, усовершенствование конструкций и тепловых режимов плавильных и нагревательных печей, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор, доктор технических наук; Н.И. Кокарев – руководитель работ по теплотехнике плавильных печей и конструкций топливосжигающих устройств, заслуженный изобретатель РСФСР, профессор; С.Г. Тройб – профессор, доктор технических наук, его научные интересы были связаны с совершенствованием технологий и тепловых режимов печей и газогенераторов, а также с контролем процессов горения топлива. Первым инженером-металлургом по специальности «Литейное производство черных и цветных металлов» в Советском Союзе стал выпускник факультета 1928 г. Н.П. Калашников.

Созданием шести кафедр было сформировано ядро металлургического факультета, который развивался, появлялись новые кафедры: металлургии тяжелых цветных металлов, металлургии стали, газо-печной теплотехники (1930 г.), металлургии легких металлов (1939 г.). Такая тенденция развития высшего образования была обусловлена планами первых пятилеток, направленных на индустриализацию страны. Строились гиганты отечественной металлургии: Магнитогорский и Новокузнецкий металлургические комбинаты, Первоуральский новотрубный завод, подвергались реконструкции старые уральские заводы, объединенные в трест «Уралчермет». Для того, чтобы справиться с задачами ввода в строй и освоения металлургических технологий и оборудования, нужны были инженеры-металлурги. Строящиеся машиностроительные заводы-гиганты – Уралмаш, Уралвагонзавод, Челябинский тракторный завод, оснащенные металлургическими цехами, также нуждались в специалистах. Для обеспечения деятельности научно-исследовательских и проектных институтов, таких как Уральский институт металлов, институт Унипромедь, Всесоюзный научно-исследовательский институт металлургической теплотехники, институт Уралгипромет, без участия которых трудно представить успехи в производственной деятельности заводов, необходимы были инженеры разных специальностей, в том числе и металлурги [6].

Выполнение задач индустриализации требовало увеличения контингента студентов и перестройки учебного процесса в направлениях:

- организации самостоятельной работы студентов, что определялось огромной жадой знаний при недостаточной теоретической подготовке студентов, вышедших из рабочей или крестьянской среды;
- введения в учебный процесс производственной практики на новейших и современных предприятиях, в период которой студенты должны были выполнять работу по заданиям промышленности;

- написания учебников, учебно-методических пособий, необходимых для обеспечения самостоятельной работы студентов.

Коллективы кафедр оказывали реальную помощь в решении проблем индустриализации страны. Группа ученых под руководством И.А. Соколова участвовала в проектировании Магнитогорского металлургического комбината, под руководством С.С. Штейнберга решала проблемы термической обработки продукции металлургических и машиностроительных заводов, молодой ученый В.В. Швейкин выполнял работу главного инженера проекта Первоуральского новотрубного завода и участвовал в его строительстве, В.А. Сорокин на Надеждинском (ныне Серовском) металлургическом заводе внедрил в эксплуатацию созданный им засыпной аппарат для доменных печей. Активную творческую работу в отраслевых и проектных институтах вели М.А. Глинков, А.Ф. Головин, Н.Н. Доброхотов, Б.И. Китаев, Н.И. Кокарев, Б.П. Сергиевский, И.А. Соколов и др. Их деятельность, наряду с решением производственных задач, повышала уровень подготовки инженерных кадров в этих организациях [2, 8].

В начале 1940/41 учебного года 5069 студентов начали учебу на всех факультетах Уральского индустриального института имени С.М. Кирова. Деятельность института по подготовке инженерных кадров для промышленности, по проведению фундаментальных и прикладных исследований, по наращиванию промышленного потенциала страны была нарушена нападением фашистских захватчиков 22 июня 1941 г. Пере-

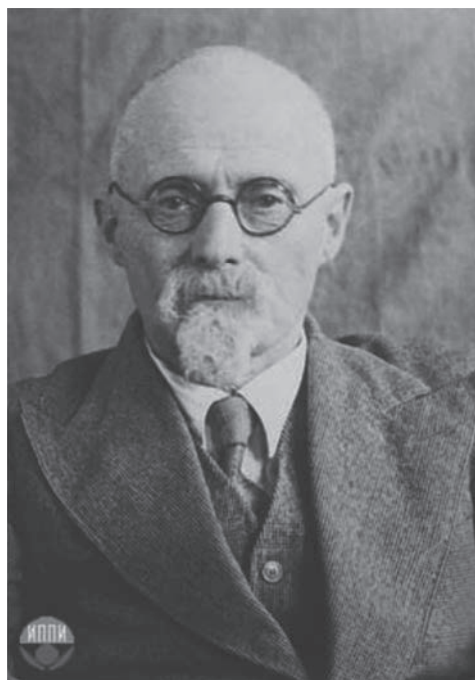


Рис. 3. Сергей Самойлович Штейнберг

Fig. 3. Sergei Samoilovich Shteinberg



Рис. 4. Бюро калибровки валков прокатных станов в годы Великой Отечественной войны  
(слева направо: В.В.Швейкин, В.П.Насонкина, А.Ф.Головин, П.А.Дунаев, Б.Н.Бухвалов, С.Е.Батунер)

Fig. 4. Bureau of rolls calibration of rolling mills in the period of World War II  
(V.V. Shveikin, V.P. Nasonkina, A.F. Golovin, P.A. Dunaev, B.N. Bukhvalov, S.E. Batuner)

стройка всей деятельности шла под лозунгом «Все для фронта, все для Победы!» [9]. Тяжелые кровопролитные бои сдерживали гитлеровские войска и позволяли демонтировать оборудование заводов и эвакуировать его в восточные районы страны. Так оборудование доменных и мартеновских печей, листопрокатных, сортопрокатных и трубопрокатных станов Днепропетровска, Запорожья, Донецка, Жданова (Мариуполя), Никополя было доставлено на уральские заводы в Магнитогорск, Нижний Тагил, Первоуральск, Северск, Каменск-Уральский, Ревду и в другие города Урала и Сибири. Поступившее оборудование необходимо было в короткие сроки ввести в эксплуатацию. Поэтому проектирование по размещению оборудования и его монтаж под лозунгом «В тылу, как на фронте!» шли практически одновременно. Ввод в эксплуатацию эвакуированного оборудования от даты его поступления на завод занимал несколько месяцев.

В первые же дни войны ушли добровольцами на фронт практически весь состав парткома, комитета комсомола и выпускники института. Студенты, выпускники и преподаватели участвовали в боях за оборону Москвы, Ленинграда, Сталинграда, в Курской битве, форсировании Днепра, освобождали страны Восточной Европы, штурмовали Берлин и Кенигсберг. Всюду они проявляли храбрость и мужество. В своих воспоминаниях Маршал Советского Союза Р.Я. Малиновский писал: «У нас, фронтовиков, укоренилось глубокое уважение к питомцам седого Урала. Это уважение и глубокая военная любовь к уральцам установилась потому, что лучше воинов, чем уралец, бесспорно мало в мире. Они овеяны славой, представляют самого лучшего, самого крепкого, самого ловкого и самого меткого бойца.

Подвиги сынов Урала в тылу сравнивались с подвигами уральцев на фронте!». Военные подвиги воспитанников и преподавателей института достойно отмечены высокими государственными наградами. Звания Героя Советского Союза заслужили 10 человек, среди них бывшие студенты металлургического факультета М.П. Воронин и В.А. Дышинский [1, 9].

Оставшиеся студенты только в первые месяцы войны отработали на предприятиях, транспорте, колхозных полях соответственно 115 000, 6 500 и 77 100 человеко-дней. В связи с привлечением студентов к сельскохозяйственным и другим работам уже в городе – на строительстве водопровода, благоустройстве площади перед институтом, учебный год начинался 1 октября и заканчивался 15 июля. Поскольку на площадях института расположились два крупных промышленных предприятия, а так же разместились учебные заведения – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова и Военно-воздушная академия им. Жуковского, сократились учебные площади. Факультет металлургии черных металлов занимал третий и четвертый этажи первого блока, четвертый этаж второго блока и пятый этаж третьего блока III учебного корпуса, причем в состав факультета входили и кафедры техники безопасности и механического оборудования металлургических заводов. В связи с этим учебные занятия были организованы в три смены.

В институте были пересмотрены планы научной работы. По почину проф. О.А. Есина ученые института принимали техническое шефство над предприятиями, выпускающими военную продукцию. Так, профессор О.А. Есин работал с коллективом Пышминского медеэлектролитного завода, профессор А.А. Горшков с сотрудниками оказывал помощь металлургам Урала в освоении технологии производства боеприпасов, при этом брак был снижен на 20 %, а технология была внедрена на аналогичных заводах страны. Бригада металлургов под руководством И.А. Соколова проделала большую работу на металлургических заводах Нижнего Тагила и Серова по улучшению качества чугуна и выплавке феррохрома – ферросплава, необходимого для производства брони и бронебойных снарядов. Профессор П.В. Умрихин на заводе им. Серова усовершенствовал технологию выплавки стали, а профессор М.А. Глишков и доцент Н.И. Кокарев разработали для такой технологии тепловые режимы ведения плавки. Проф. А.Ф. Головин помогал коллективам заводов внедрять передовые достижения науки и новые технологии прокатки. Профессор В.И. Смирнов установил тесные связи с заводами цветной металлургии. Он много внимания уделял совершенствованию производства, связанному с выполнением оборонных заказов, что обеспечило сокращение длительности пускового периода при вводе в эксплуатацию новых объектов [6, 7, 10, 11]. Заслуги ученых-металлургов Уральского индустриального института были высоко оценены Президиумом Вер-

ховного Совета СССР. Орденом Ленина был удостоен А.Ф. Головин, орденом Трудового Красного Знамени – И.А. Соколов, орденами Знак Почета – Ф.Ф. Вольф, М.А. Глишков, А.А. Горшков, С.И. Тельный. Лауреатами Сталинской премии стали Ф.Ф. Вольф за разработку и внедрение метода переработки уральских бокситов (1942 г.), В.В. Михайлов за внедрение технологии доменного феррохрома (1942 г.), А.Ф. Головин за работы по оборонной тематике (1943 г.).

Ученые металлургического факультета Уральского политехнического института имени С.М. Кирова (переименован в 1948 г.) в послевоенное время не только сохранили чувство ответственности и высокий научный потенциал, но и приумножили эти качества, воспитав новое поколение активных исследователей из числа выпускников, среди которых были и участники Великой Отечественной войны [9]. Фронт научных и прикладных работ был обширен. Страна восстанавливала народное хозяйство в районах, освобожденных от фашистских захватчиков. По существу в Украине, Белоруссии, Прибалтике, западных областях СССР создавались новые промышленные предприятия. Увеличивали производство чугуна, стали, проката металлургические заводы Урала, Сибири и Центра страны. Металл нужен был всем – машиностроению, строительству промышленных и жилых зданий, железнодорожному транспорту, средствам связи, оборонной промышленности, атомной энергетике и другим отраслям. Если в начале пятидесятых годов прошлого века в СССР было выплавлено около 50 млн т стали, то в середине восьмидесятых металлургические заводы страны выдавали 170 млн т стали, занимая по этому показателю первое место в мире.

Творческая активность ученых факультета в этой работе была оценена Государственными премиями СССР. Премии получили М.И. Гольдштейн (1979 г.), О.А. Есин, Л.Н. Бармин, П.В. Гельд, Ю.П. Никитин, С.И. Попель, А.И. Сотников, И.Т. Срывагин, Г.А. Топошищев, П.М. Шурыгин (1982 г.), В.Н. Давыдов (1989 г.).

Трудности в работе коллектива возникли после распада Советского Союза [2, 6, 10]. Заводы России лишились традиционных источников сырья и потребителей металлопродукции. На установление новых связей потребовалось время. Металлургические заводы в числе немногих предприятий страны нашли возможности и перестроили свою структуру, ликвидировав мартеновское производство, увеличили долю стали, выплавляемой в электропечах, а также разливаемой на машинах непрерывного литья заготовок, внедрили внепечную обработку стали, ввели в строй новые прокатные станы. Возникавшие при этом сложности, связанные с освоением новых технологий и оборудования, были решены, в том числе и с участием коллектива ученых металлургического факультета Уральского государственного технического университета – УПИ [2, 7, 12]. Много внимания уделялось методическому обеспечению учебного



Рис. 5. Почетного гостя кафедры металлургических печей академика АН УССР Н.Н. Доброхотова (в центре) на вокзале г. Свердловска (1960 г.) встречают профессор Б.И. Китаев (справа) и Н.Н. Кокарев (слева)

Fig. 5. Honorary guest of the Chair of Metallurgical furnaces academician of Ukrainian Academy of Sciences N.N. Dobrokhoto (in the center) at the Sverdlovsk train station in (1960) met with Professor B.I. Kitaev (right) and N.N. Kokarev

процесса. За создание комплексов учебников и учебных пособий премии Правительства Российской Федерации в области образования были присуждены преподавателям факультета: С.С. Набойченко (дважды), И.Ф. Худякову, С.В. Карелову, А.П. Дорошкевичу, Н.Г. Агееву, С.Э. Кляйну, С.Н. Гушину, В.И. Лобанову, В.Л. Советкину, Ю.Г. Ярошенко. За успехи в области науки и техники такой же премией были отмечены В.П. Кузнецов и В.П. Лесников.

Новая глава в истории металлургического образования на среднем Урале началась в 2010 г. в результате создания Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина [11, 13], в составе которого был образован Институт материаловедения и металлургии на базе двух факультетов – металлургического и строительного материаловедения, каждый из которых стал Департаментом. Такое объединение повысило качество подготовки специалистов, поскольку вывело существующие программы обучения на новый уровень благодаря объединению знаний, а также лабораторной и методической базам. С помощью предприятий-партнеров созданы исследовательские и производственные комплексы института, соответствующие самым современным стандартам. Студенты уже на стадии обучения занимаются научной деятельностью, реализуемой в производстве, в котором они будут востребованы по окончании обучения.

В Департамент металлургии вошли следующие кафедры [7].

- Теории металлургических процессов.
- Металлургии железа и сплавов.
- Металлургии тяжелых цветных металлов.

- Металлургии легких металлов.
- Теплофизики и информатики в металлургии.
- Обработки металлов давлением.
- Металловедения.
- Термообработки и физики металлов.
- Литейного производства и упрочняющих покрытий.
- Технологии художественной обработки металлов.
- Метрологии, стандартизации и сертификации.
- Отраслевой горно-металлургический научно-исследовательский и проектный институт.
- Лаборатория вычислительной техники.

Контингент преподавателей Департамента металлургии в настоящее время составляет 152 человека (штатных) и 99 человек (совместителей), среди которых 6 академиков и чл.-корр. РАН, 57 профессоров, докторов технических наук, 8 профессоров, кандидатов технических наук, 132 доцентов, кандидатов технических наук.

Поставленная перед университетом задача о вхождении в первую сотню вузов мира определила планы работ института и его департаментов на ближайшие годы. Основные направления деятельности включают:

- развитие научных исследований, инновационной деятельности с привлечением к этой работе студентов бакалавриата и магистратуры;
- публикация достижений науки и образовательного процесса в информационных источниках, входящих в международные базы данных Scopus и WoS;
- разработка учебно-методической документации для обеспечения образовательного процесса, отвечающего требованиям международных стандартов.

На Ученом совете университета были подведены итоги научной деятельности Института материаловедения и металлургии за 2014 г. Объем НИР по заказам предприятий составил 134 млн руб. По этому показателю Институт занял третье место среди 21-го подразделения университета. Сотрудниками Института опубликовано 9 монографий, 26 учебников и учебных пособий, 806 статей, 153 из которых вошли в базы данных Scopus и WoS, получено 49 патентов на изобретения. Преподаватели и студенты приняли участие в 111 международных и российских научных конференциях, представили на выставках 94 экспоната, 24 из которых отмечены премиями и дипломами. Для повышения уровня образовательного процесса в департаментах института созданы новые учебные и научные лаборатории, оснащенные новейшим оборудованием.

Естественно, что достижение таких показателей стало возможным при развитии и укреплении творческих связей с металлургическими заводами, научными институтами УРО РАН и фирмами Урала, ближнего

и дальнего зарубежья. Партнерами преподавателей и ученых Департамента металлургии являются специалисты-коллеги Уральской горно-металлургической компании, Трубной металлургической компании, корпорации ВСМПО-АВИСМА, Компании группы «Синара», ОАО «Мечел», заводов Екатеринбурга, Нижнего Тагила, Ревды, Магнитогорска, а также вузов и фирм Украины, Казахстана, Канады, Китая, Германии, Польши, Хорватии и др. Примером такого сотрудничества служит совместный проект ООО УГМК-Холдинг и УрФУ, реализацией которого стало открытие 4 сентября 2014 г. лабораторного корпуса Технического университета УГМК в Верхней Пышме. Этот корпус укомплектован совершенно новым оборудованием, на котором проводятся опытные и промышленные исследования физико-химических и теплофизических процессов металлургических технологий. При этом учтены все требования развивающейся промышленности. Таким образом, созданы благоприятные условия для познания студентами-бакалаврами, магистрами и специалистами предприятий теоретических закономерностей технологических процессов и алгоритмов их практического воплощения.

С 1920 г. более 300 000 студентов получили высшее металлургическое образование. Аспиранты и соискатели защитили более 1200 кандидатских диссертаций. Было защищено около 250 докторских диссертаций.

Институт материаловедения и металлургии встречает 95-летний юбилей как динамично развивающийся организм, отвечающий на вызовы времени перестройкой и совершенствованием своей структуры, развитием научных исследований и инновационной деятельностью, соответствующим мировому уровню высшего образования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Уральский политехнический институт им. С.М. Кирова 1920 – 1970 (Исторический очерк) / Под ред. А.В. Бакунина. – Екатеринбург: УПИ, 1970. – 404 с.
2. Уральский государственный технический университет. 1920 – 1995 гг.: Исторический очерк / Под ред. Б.В. Личмана. – Екатеринбург: УГТУ, 1995. – 352 с.
3. Прошлое и настоящее – наше будущее / Под ред. Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 263 с.
4. Ведущие ученые Уральского государственного университета. Биографический справочник / Под ред. Б.В. Личмана. – Екатеринбург: УГТУ, 1995. – 352 с.
5. Научные школы Уральского государственного университета. История и современность / Под ред. Б.В. Личмана. – Екатеринбург: УГТУ, 1995. – 392 с.
6. Вестник УГТУ–УПИ. Страницы истории (1920 – 1965) / Под ред. С.С. Набойченко. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2005. № 23 (53). Вып. 2. – 261 с.
7. Гордимся званием «металлурги»! Юбилейный выпуск, посвященный 85-летию факультета / Под ред. С.Н. Гущина. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 175 с.
8. Уральский государственный технический университет – УПИ: 80 лет / Под ред. С.С. Набойченко. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2000. – 88 с.

9. УГТУ–УПИ: Очерки истории 1920 – 2005 / Под ред. С.С. Набойченко. – Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2005. – 608 с.
10. Уральский индустриальный в Великой Отечественной ... 1941–1945 / Под С.С. Набойченко. – Екатеринбург: Изд-во АМБ, 2005. – 319 с.
11. Вестник УГТУ–УПИ. Страницы истории (1966–2005) / Под ред. С.С. Набойченко. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. № 2. Вып. 3. – 337 с.

12. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. 1920–2010. Почетные выпускники. – Екатеринбург: Изд-во Реал-Медиа, 2010. – 392 с.
13. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. 1920 – 2010. Этапы большого пути. – Екатеринбург: Изд-во Реал-Медиа, 2010. – 212 с.

Поступила 10 апреля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 9, pp. 617–624.

## SCIENTISTS AND EDUCATORS, THEIR CREATIVITY – SCIENTIFIC AND TECHNICAL BASIS OF OUR ACHIEVEMENTS (TO THE 95TH ANNIVERSARY OF METALLURGICAL EDUCATION IN THE MIDDLE URALS)

**Mal'tsev V.A.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of Institute of Materials Science and Metallurgy (immt@urfu.ru)  
**Naboichenko S.S.**, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences (RAS), Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Metallurgy of Heavy Non-ferrous Metals”  
**Yaroshenko Yu.G.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

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

**Abstract.** Higher education in the Middle Urals was established by Lenin decree of on October 19, 1920. The structure of the Ural University provided a Polytechnic Institute with chemical-metallurgical faculty. The organizers of the educational process in the metallurgical chair were prominent Russian scientists and leaders of metallurgical plants in the Urals: Grum-Grzhimailo V.E., Sokolov I.A., Sergievskii B.P., Golovin F.A., Steinberg S.A. The authors have consistently reviewed the activities of the team of teachers in the period of industrialization of the country during the Second World War, in the postwar period and after the establishment of the Institute of Materials Science and Metallurgy in the Ural Federal University named after the first President of RF B.N. Yeltsin.

**Keywords:** university, institute, faculty, chair, educational process, scientists, teachers, results of operations.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-617-624

### REFERENCES

1. *Ural'skii politekhnicheskii institut im. S.M. Kirova 1920–1970 (Istoricheskii ocherk)* [Ural Polytechnic Institute named after Kirov S.M. 1920–1970 (Historical review)]. Bakunin A.V. ed. Ekaterinburg: UPI. 1970. 404 p. (In Russ.).
2. *Ural'skii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. 1920–1995 gg.: Istor. Ocherk* [Ural State Technical University. 1920–1995: Historical review]. Lichman B.V. ed. Ekaterinburg: UGTU, 1995. 352 p. (In Russ.).
3. *Proshloe i nastoyashchee – nashe budushchee* [Past and present – our future]. Yaroshenko Yu.G. ed. Ekaterinburg: UGTU–UPI, 2005. 263 p. (In Russ.).
4. *Vedushchie uchenye Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Biograficheskii spravochnik* [The leading scientists of the Ural State University. Biographical directory]. Lichman B.V. ed. Ekaterinburg: UGTU, 1995. 352 p. (In Russ.).
5. *Nauchnye shkoly Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Istoriya i sovremennost'* [Scientific schools of the Ural State University. History and modernity]. Lichman B.V. ed. Ekaterinburg: UGTU, 1995. 392 p. (In Russ.).
6. *Pages of History (1920 – 1965)*. Naboichenko S.S. ed. *Vestnik UGTU–UPI*, 2005, no. 23 (53). Issue 2. 261 p. (In Russ.).
7. *Gordimsya zvan'em "metallurgi"! Yubileyniy vypusk, posvyashchenniy 85-letiyu fakul'teta* [We're proud for the title of “Metallurgists”! The issue dedicated to the 85th anniversary of the faculty]. Gushchin S.N. ed. Ekaterinburg: UGTU–UPI, 2005. 175 p. (In Russ.).
8. *Ural'skii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet – UPI: 80 let* [Ural State Technical University – 80 years]. Naboichenko S.S. ed. Ekaterinburg: UGTU–UPI, 2000. 88 p. (In Russ.).
9. *UGTU–UPI: Ocherki istorii 1920–2005* [Ural State Technical University – Ural Technical Institute: Historical Essays 1920–2005]. Naboichenko S.S. ed. Ekaterinburg: Izd-vo AMB, 2005. 608 p. (In Russ.).
10. *Ural'skii industrial'nyi v Velikoi Otechestvennoi ... 1941–1945* [Ural Industrial Institute in the period of Second World War 1941–1945]. Naboichenko S.S. ed. Ekaterinburg: Izd-vo AMB, 2005. 319 p. (In Russ.).
11. *Pages of History (1966–2005)*. Naboichenko S.S. ed. *Vestnik UGTU–UPI*, 2005, no. (2). Issue 3. 337 p. (In Russ.).
12. *Ural'skii federal'nyi universitet imeni pervogo Prezidenta Ros-sii B.N. El'tsina. 1920–2010. Pochetnye vypuskniki* [Ural Federal University named after the first President of Russia Boris Yeltsin. 1920–2010. Honorary graduates]. Ekaterinburg: Izd-vo «Real-Media». 2010. 392 p. (In Russ.).
13. *Ural'skii federal'nyi universitet imeni pervogo Prezidenta Ros-sii B.N. El'tsina. 1920 – 2010. Etapy bol'shogo puti* [Ural Federal University named after the first President of Russia Boris Yeltsin. 1920–2010. Steps of the long way]. Ekaterinburg: Izd-vo «Real-Media». 2010. 212 p. (In Russ.).

Received April 10, 2015

УДК 669.162.27.003.1

## СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭМИССИЯ ПАРНИКОВОГО ГАЗА $\text{CO}_2$ В ПЕРЕДЕЛАХ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

*Лисиенко В.Г., д.т.н., профессор кафедры автоматики (lisienko@mail.ru)*

*Лаптева А.В., старший преподаватель кафедры автоматики*

*Чесноков Ю.Н., к.т.н., доцент кафедры автоматики*

*Луговкин В.В., к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»*

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

**Аннотация.** Парниковый газ  $\text{CO}_2$  образуется во всех технологических процессах черной металлургии. Выделены три типа эмиссий диоксида углерода различных переделов черной металлургии: процесса, транзитная и сквозная. Сквозная эмиссия диоксида углерода того или иного передела является суммой интегральных эмиссий процесса и транзитной. Предложена классификация переделов черной металлургии по механизму образования эмиссии диоксида углерода. Выделено пять типов переделов, к которым можно отнести нагревательные печи, конвертеры, мартеновские печи, доменные печи, коксовые батареи. Приведены значения сквозных эмиссий диоксида углерода для шести сочетаний переделов, на выходе которых получается сталь.

**Ключевые слова:** эмиссия, парниковый газ, диоксид углерода, передел, черная металлургия, граф, сквозная эмиссия.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-625-629

Парниковый газ  $\text{CO}_2$  образуется во всех технологических процессах черной металлургии при сжигании органического топлива, выгорании углерода из полуфабриката, разложении составляющих флюсов. Другой парниковый газ, метан, входит в состав вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) и сгорает до диоксида углерода в процессе использования ВЭР. Таким образом, широко распространенное за рубежом понятие углеродного следа в черной металлургии можно свести к понятию интегральной сквозной эмиссии диоксида углерода  $M_C$ , которая является суммой эмиссий  $\text{CO}_2$ , последовательно возникающих во всех процессах технологической цепи, начиная с добычи сырья и кончая тем продуктом, для которого эта эмиссия определяется – транзитных эмиссий. Сквозная эмиссия  $\text{CO}_2$  того или иного передела является суммой интегральных эмиссий  $\text{CO}_2$  процесса  $M_{\Pi}$  и транзитной  $M_T$ :

$$M_C = M_{\Pi} + M_T. \quad (2.3)$$

Транзитная эмиссия определяет долю от суммарной массы эмиссии диоксида углерода, образованного в предыдущих процессах.

Различные технологические схемы характеризуются разными объемами образования диоксида углерода. Эмиссии диоксида углерода посвящено много работ [1 – 6], однако требуются дополнения и уточнения при сравнительной оценке различных переделов черной металлургии по эмиссии диоксида углерода.

В реальных процессах диоксид углерода в продуктах сгорания присутствует вместе с оксидом углерода. Например, доменный газ содержит 25 – 27 %  $\text{CO}$  и 16 – 23 %  $\text{CO}_2$  в зависимости от содержания кислорода в дутье. Часть  $\text{CO}$  используется непосредственно в доменном процессе – окисляется в воздушнонагревателях до  $\text{CO}_2$ . Но большая часть сгорает в котлах местных электростанций, обеспечивая до 90 % электроэнергии, потребляемой металлургическими предприятиями, а в простейшем случае  $\text{CO}$  сжигается в факелах или дожигается в специальных устройствах. Таким образом, массу  $\text{CO}_2$ , образующегося в доменном, коксохимическом, электродуговом, мартеновском процессах определим с учетом дожигания  $\text{CO}$  по суммарной массе углерода, содержащегося в соответствующих топливах. В этой связи всю массу диоксида углерода, полученного от сгорания топлива в доменной печи, в воздушнонагревателях, в котлах местных электростанций отнесем к доменной печи, т. е. к чугуно. По этой причине эмиссии  $M_{\Pi}$ ,  $M_T$ ,  $M_C$  названы интегральными.

Понятие интегральной эмиссии можно пояснить материальными потоками вторичных энергетических ресурсов металлургического комбината (рис. 1). На входе рассматриваются уголь, природный газ и известняк. Все ВЭР используются внутри комбината. Следовательно итоговая или интегральная эмиссии диоксида углерода определяются количеством углерода, поступившим с углем и природным газом, а также количеством разложившегося известняка в агломерационном процессе. Изменим схему потоков ВЭР, пред-

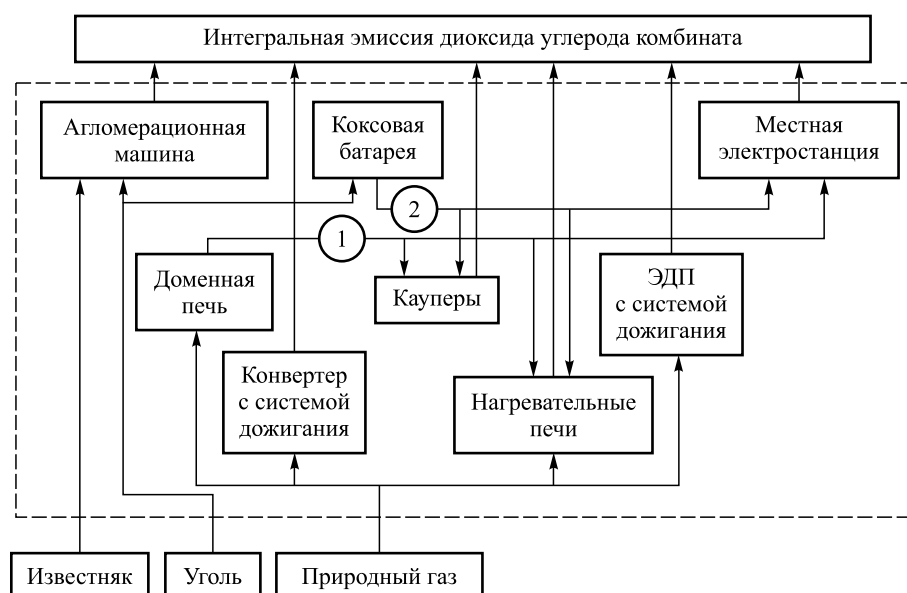


Рис. 1. Образование интегральной эмиссии диоксида углерода металлургического комбината:  
1 – доменный газ; 2 – коксовый газ

Fig. 1. Formation of integrated emission of carbon dioxide of metallurgical plant:  
1 – blast furnace gas; 2 – coke gas

полагая, что все они используются в самом процессе, например через местную электростанцию (рис. 2). При этом, для исключения двойного счета, потоки ВЭР, например на нагревательные печи, коксовые батареи, кауперы и другие агрегаты из схемы удалены. На рис. 2 итоговые эмиссии диоксида углерода тем или иным агрегатом обозначены  $CO_2^i$ . Сумма  $CO_2^i$  при  $i$  от 1 до 6 равна итоговой эмиссии комбината, т.е. сумме эмиссий

агрегатов, показанных на рис. 1. В этом случае интегральную эмиссию процесса  $M_{II}$  можно определить по количеству полностью сгоревшего углерода в процессе при допущении того, что все топливные ВЭР сгорают прямо или косвенно в этом же процессе. Такой подход повышает точность оценки эмиссии диоксида углерода и упрощает методику сравнения различных переделов по этому показателю. Для предотвращения двойного

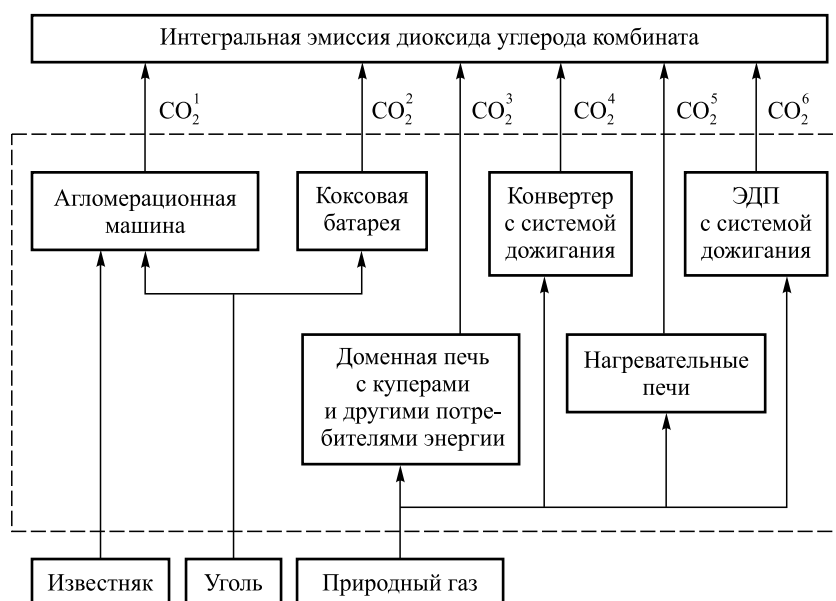


Рис. 2. Образование интегральной эмиссии диоксида углерода металлургического комбината с допущением использования всех ВЭР в самом процессе

Fig. 2. Formation of integrated emission of carbon dioxide of metallurgical plant with assuming in the process of the use of all secondary power resources

счета исключаем учет использования ВЭР, полученных в анализируемом и в других процессах.

При таком подходе можно выделить пять типов металлургических переделов по механизму образования диоксида углерода.

**Тун 1.** Процессы, в которых сжигается топливо. К таким процессам относятся агломерационные машины, обжиговые печи железорудных окатышей, нагревательные печи прокатного производства, процессы термической обработки, парогенераторы электростанций. В агломерационном процессе используется известняк. Эмиссия  $\text{CO}_2$  при его разложении вычисляется отдельно и суммируется с эмиссией диоксида углерода, полученной от сгорания углерода.

**Тун 2.** Процессы, в которых выгорает углерод из металла шихты, но топливо не используется. Это все виды конвертерного производства и в том числе кислородно-конвертерного с дожиганием оксида углерода в конвертере или в факеле.

**Тун 3.** Процессы, в которых выгорает углерод из металла шихты и сжигается топливо. К таким процессам можно отнести мартеновское производство.

**Тун 4.** Процессы, в которых сжигается топливо и часть углерода переходит в конечный продукт. Прежде всего, это доменный процесс. Кроме того, к этому типу процессов относятся все бескоксковые технологии (HyL-3, Midrex, COREX, POMELT). Доменный газ содержит много оксида углерода и используется как топливо для воздушнонагревателей доменной печи. Однако значительное количество доменного газа не используется в воздушнонагревателях. Эта часть его используется для выработки электроэнергии, которая служит для получения кислорода, воды на охлаждение, воздушного дутья.

**Тун 5.** Процессы, в которых происходит возгонка летучих фракций топлива, используемых как топливо в этих же процессах. К ним отнесем коксование. В этом процессе сжигается топливо для прогрева коксовых батарей. Этим топливом является коксовый, доменный газ или их смесь и образование диоксида углерода в них вычисляется в соответствующем типе технологических процессов. Выделенный углерод в процессе возгонки в составе угарного газа дожигается при использовании коксового газа в качестве топлива. Избыток коксового газа сжигается в факелах коксовых батарей или в котлах местных электростанций. Таким образом, весь углерод, полученный в результате возгонки, образует диоксид углерода. Если для обогрева коксовых батарей используется природный газ, то такое коксование следует отнести к новому типу технологических процессов, который здесь не рассматривается из-за его неэффективности.

Для каждого типа найдены формулы для вычисления значения интегральной эмиссии диоксида углерода [7].

Значение сквозной интегральной эмиссии передела можно определить, используя графовую модель эмиссий (рис. 3). Вершины этого ориентированного графа соответствуют процессу или ресурсу [8]. В скобках ука-

заны значения эмиссий: сквозной, если имеется одно число, или процесса и через дробную черту сквозной, если указаны два числа. Каждой дуге поставлено в соответствие число – вес, равный расходу того или иного ресурса. Для исключения двойного счета эмиссий диоксида углерода при их расчете в доменном процессе исключены эмиссии от электроэнергии, например для получения кислорода, обеспечения дутья и т.п. (в скобках проставлены нули).

В общем виде будет справедлива следующая формула для вычисления значения сквозной эмиссии в той или иной вершине

$$M_{Cik} = M_{\Pi ik} + \sum_{i=1}^L \left( G_{ik} \sum_{j=1}^N P_{jk} \right) + \sum_{l=1}^M \left( M_{\Pi il} \sum_{j=1}^P P_{jl} \right),$$

где  $L$  – число источников (вершин графа, из которых дуги только выходят);  $N$  – число путей из вершины-источника к анализируемой вершине;  $P_{jk}$  – передачи соответствующего пути – произведения весов дуг, например,  $\Psi_{11} \Psi_{31} \Psi_{51} \Psi_{71}$ ;  $M$  – число вершин, соответствующих процессам, у которых эмиссия процесса не равна нулю;  $P$  – число путей из таких вершин к анализируемой вершине.

Длина путей различна. Здесь индекс  $i$  соответствует номеру передела в технологической цепи, а индекс  $k$  означает эмиссию диоксида углерода от  $k$ -го источника в  $i$ -м переделе,  $l$  – номер вершины в  $i$ -м переделе, у которой эмиссия процесса не равна нулю.

Приведем пример оценки интегральной эмиссии  $M_{\Pi}$  доменной печи при расходе кокса 0,323 т/т чугуна или 0,275 т углерода, природного газа – 61 м<sup>3</sup>/т чугуна или 0,033 т углерода, пылеугольного топлива – 0,13 т/т чугуна или 0,093 т углерода по суммарной массе окисленного углерода:  $0,275 + 0,033 + 0,093 = 0,401$  т/т чугуна. Газа  $\text{CO}_2$  из этого углерода получится 1320 т или 667,7 м<sup>3</sup>/т чугуна. Такая итоговая масса диоксида углерода образуется в самом доменном процессе и в процессах по реализации ВЭР – доменного газа.

Можно значения сквозных эмиссий считать по частям. Например для доменной печи найдем

$$M_C = 1320 + 197 \cdot 0,6 + 417 \cdot 1,0 + 429,7 \cdot 0,323 + + 30 \cdot 0,13 + 0,234 \cdot 61 = 2036 \text{ кг/т чугуна.}$$

Предложенная трактовка эмиссий диоксида углерода позволила провести сравнение сочетаний переделов черной металлургии, на выходе которых получается сталь (см. таблицу).

**Выводы.** Эмиссия парникового газа  $\text{CO}_2$  разделена на три типа: процесса, транзитная и сквозная.

Предложены типы переделов в черной металлургии в зависимости от механизма образования эмиссии диоксида углерода.

Даны сравнительные результаты расчетов эмиссии  $\text{CO}_2$  для различных процессов черной металлургии.

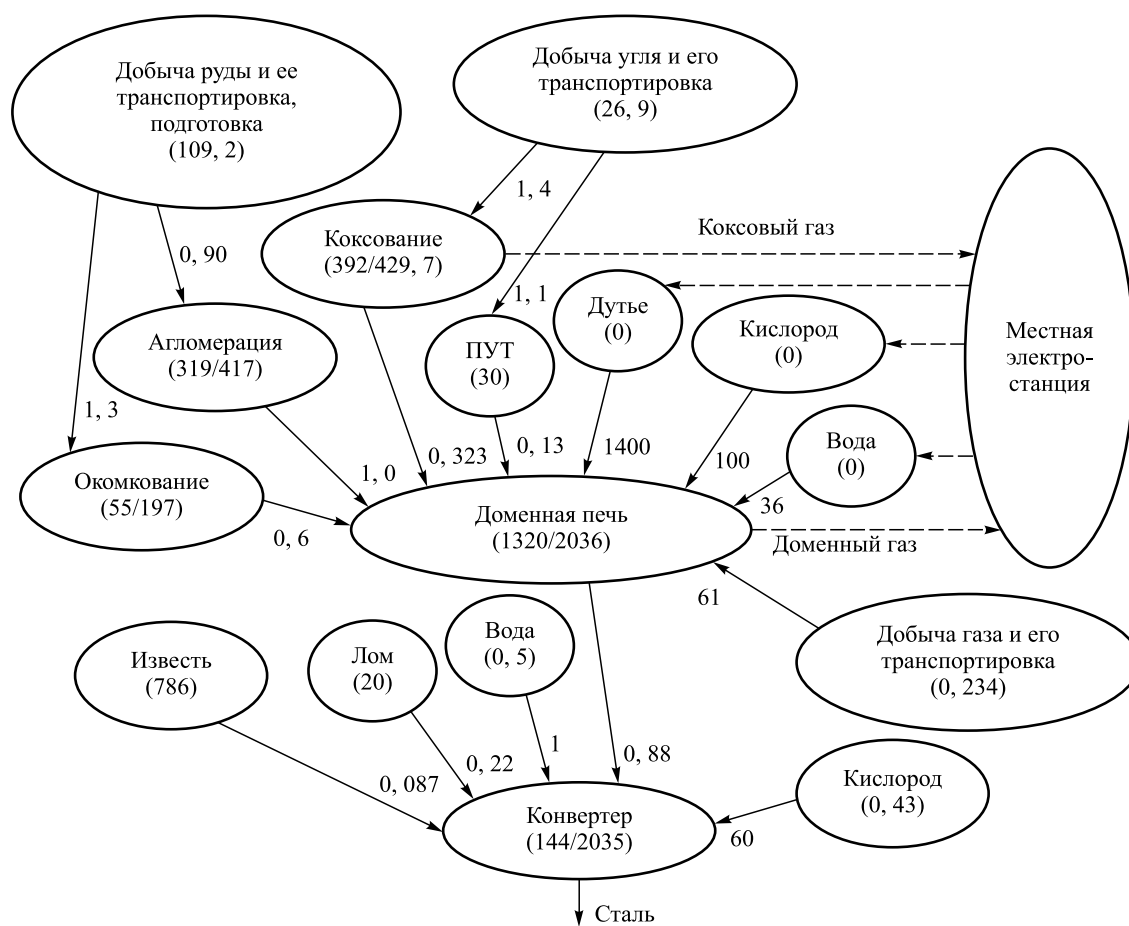


Рис. 3. Граф эмиссий диоксида углерода аглодоменного производства с вдуванием природного газа и пылеугольного топлива

Fig. 3. Graph of carbon dioxide emissions of sintering and blast furnace production with injection of natural gas and powdered coal

### Значения эмиссий диоксида углерода в различных сочетаниях металлургических переделов производства стали

#### The emissions of carbon dioxide in various combinations of metallurgical processes of steel production

| Процесс                  | Эмиссия на 1 т<br>продукции |                             | Ранг<br>процесса<br>по эмиссии<br>CO <sub>2</sub> |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|
|                          | сквозная,<br>кг             | объемная,<br>м <sup>3</sup> |                                                   |
| HyL-3 + ЭДП <sup>1</sup> | 1125                        | 569                         | 1                                                 |
| Midrex + ЭДП             | 1224                        | 619                         | 2                                                 |
| ДП <sup>2</sup> + ЭДП    | 1365                        | 690                         | 3                                                 |
| РОМЕЛТ + ЭДП             | 2004                        | 1015                        | 4                                                 |
| COREX + ЭДП              | 2018                        | 1021                        | 5                                                 |
| ДП + конвертер           | 2120                        | 1072                        | 6                                                 |

<sup>1</sup> ЭДП – электродуговая печь;

<sup>2</sup> ДП – доменная печь без вдувания пылеугольного топлива.

<sup>1</sup> ЭДП – electric arc furnace;

<sup>2</sup> ДП – blast furnace without a pulverized coal injection.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Потапочкин А.Н., Симонян Л.М., Черноусов П.И., Косырев К.Л. Потребление углерода и выбросы CO<sub>2</sub> в черной металлургии: варианты оценки // Сталь. 2004. № 9. С. 69 – 72.
2. Шевелев Л.Н. Методические основы инвентаризации парниковых газов в черной металлургии России // Сталь. 2007. № 4. С. 97 – 102.
3. Шевелев Л.Н. Оценка выбросов парниковых газов в черной металлургии России // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». 2008. № 8. С. 3 – 8.
4. Каленский И.В. Рекомендации по учету выбросов CO<sub>2</sub> на предприятиях черной металлургии // Сталь. 2007. № 5. С. 121 – 129.
5. Казаков Р.А., Зволинский В.П., Черноусов П.И. Совершенствование методологических подходов к комплексной оценке выбросов парниковых газов в черной металлургии // Металлург. 2011. № 12. С. 27 – 31.
6. Казаков Р.А. Исследование возможности повышения энергетической эффективности и сокращения выбросов парниковых газов на предприятиях черной металлургии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2013. – 27 с.
7. Чесноков Ю.Н., Лисиенко В.Г., Лаптева А.В. Математические модели косвенных оценок эмиссии CO<sub>2</sub> в некоторых металлургических процессах // Сталь. 2011. № 8. С. 74 – 77.
8. Чесноков Ю.Н., Лисиенко В.Г., Лаптева А.В. Разработка графов эмиссии диоксида углерода металлургическими предприятиями // Металлург. 2012. № 12. С. 23 – 26.

Поступила 10 апреля 2015 г.

COMPARATIVE EMISSION OF GREENHOUSE GAS CO<sub>2</sub> IN THE PROCESSING OF FERROUS METALLURGY

**Lisienko V.G.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Automatics” (lisienko@mail.ru)

**Lapteva A.V.**, Senior Lecturer of the Chair “Automatics”

**Chesnokov Yu.N.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Automatics”

**Lugovkin V.V.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

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

**Abstract.** Carbon dioxide – a greenhouse gas – is formed in all industrial processes of iron and steel industry. We can identify three types of emissions of carbon dioxide of ferrous metallurgy processing: process, transit and through. Through emission of carbon dioxide of different processing is the sum of the integral emission of carbon dioxide of the process and transit. A classification of the processing in the iron industry on the mechanism of formation of carbon dioxide emissions is proposed. The authors have identified five types of processing, which include redistributions, respectively, heating furnace, converters, open-hearth furnaces, blast furnaces and coke batteries. The values of cross-cutting carbon dioxide emissions for the six combinations of steel production stages are presented.

**Keywords:** emission, greenhouse gas, carbon dioxide, processing, ferrous metallurgy, graph, cross-cutting emission.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-625-629

## REFERENCES

1. Potapochkin A.N., Simonyan L.M., Chernousov P.I., Kosyrev K.L. Consumption of carbon and CO<sub>2</sub> emissions. *Stal'*. 2004, no. 9, pp. 69–72. (In Russ.).
2. Shevelev L.N. Methodical bases of an inventory of greenhouse gases in the Russian steel industry. *Stal'*. 2007, no. 4, pp. 97–102. (In Russ.).
3. Shevelev L.N. Evaluation of greenhouse gases in the Russian steel industry. *Byull. "Chernaya metallurgiya"*. Moscow: OAO "Chermetinformatsiya". 2008, Issue 8 (1304), pp. 3–8. (In Russ.).
4. Kalenskii I.V. Recommendations on account of CO<sub>2</sub> emissions at the enterprises of ferrous metallurgy. *Stal'*. 2007, no. 5, pp. 121–129. (In Russ.).
5. Kazakov R.A., Zvolinskii V.P., Chernousov P.I. Improving methodological approaches to the systematic evaluation of greenhouse-gas emissions in ferrous metallurgy. *Metallurgist*. 2012, vol. 55, no. 11–12, pp. 867–872.
6. Kazakov R.A. *Issledovanie vozmozhnosti povysheniya energeticheskoi effektivnosti i sokrashcheniya vybrosov parnikovyykh gazov na predpriyatiyakh chernoi metallurgii: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Possibility of increasing energy efficiency and reducing greenhouse gas emissions at the enterprises of ferrous metallurgy: Cand. Sci. diss.]. Moscow: 2013. 27 p. (In Russ.).
7. Chesnokov Yu.N., Lisienko V.G., Lapteva A.V. Mathematical models of indirect estimates of CO<sub>2</sub> emissions in some metallurgical processes. *Stal'*. 2011, no. 8, pp. 74–77. (In Russ.).
8. Chesnokov Yu.N., Lisienko V.G., Lapteva A.V. Graph model for carbon dioxide emissions from metallurgical plants. *Metallurgist*. 2013, vol. 56, no. 11–12, pp. 888–893.

Received April 10, 2015

## THE MODERN TECHNOLOGY OF IRON AND STEEL PRODUCTION AND POSSIBLE WAYS OF THEIR DEVELOPMENT

**Gordon Y.<sup>1</sup>**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Technical Director of Ironmaking technology (igordon@hatch.ca)

**Kumar S.<sup>1</sup>**, Director, Iron & Steel Business Unit

**Freislich M.<sup>1</sup>**, Manager of Performance Enhancement

**Yaroshenko Y.<sup>2</sup>**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

<sup>1</sup> Hatch Ltd.

(2800, Speakman Dr., Mississauga, ON L5K 2R7, Canada)

<sup>2</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

(19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

**Abstract.** In the changing global market scenario for raw materials for the steel industry, a number of novel iron- and steelmaking process technologies are being developed to provide the steel companies with economically-sustainable alternatives for iron- and steel-making. In addition, the steel industry is also focusing on reduction of energy consumption as well as green-house gas (GHG) emissions to address the crucial subject of climate change. Climate change is presenting new risks to the highly energy- and carbon-intensive, iron and steel industry. The industry needs to focus on reduction of energy consumption as GHG emissions to address climate change. Development of alternate iron- and steelmaking process technologies can provide steel companies with economically-sustainable alternatives for steel production. For managing climate change risks, novel modeling tools have been developed by Hatch to quantify and qualify potential energy savings and CO<sub>2</sub> abatement within the iron and steel industry. The tool developed for abatement of greenhouse gas carbon is called G-CAP<sup>TM</sup> (Green-House Gas Carbon Abatement Process) while that developed for improving energy efficiency is called En-MAP<sup>TM</sup> (Energy Management Action Planning). Evaluation of existing operations have shown that most integrated plants have GHG and energy abatement opportunities; on the other hand, the best-in-class plants may not have a lot of low-risk abatement opportunities left, even at high CO<sub>2</sub> price. In this context, it is important to assess these critical issues for the alternate iron- and steelmaking technologies that have been developed. This paper presents a comparative evaluation of energy-efficiency and GHG emissions for some selected iron- and steelmaking technologies that are being considered for implementation. In this work, Hatch's G-CAP<sup>TM</sup> and En-MAP<sup>TM</sup> tools that were developed with the main objective of quantifying and qualifying the potential energy savings and CO<sub>2</sub> abatement within the iron and steel industry, were employed in the evaluation conducted.

**Keywords:** blast furnace ironmaking, alternative ironmaking technology, melting, direct reduced iron (DRI), hot briquetted iron (HBI), nuggets, pig iron (PI), technology selection.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-630-637

### Introduction

The iron and steel industry continues to transform itself and evolve in the ever-changing global market place – the raw material scenario is constantly changing with respect to quality and quantity (availability), there is stiff competition in both global and local markets, and there is increasing pressure to address global climate change issues, especially since the steel industry is highly energy- and carbon-intensive. There is growing importance of steel production in developing countries such as China and India – this means that the steel industry in these countries will play an important role in defining and shaping the future of the industry.

Climate change is expected to present new risks to the steel industry with respect to ensuring a sustainable business. Legislators are proposing to limit GHG emission by placing an implicit price on CO<sub>2</sub> emission – market-based “cap and trade”, carbon tax etc. In this scenario, it is important for the steel companies to reduce exposure to climate-related risks and at the same time, find business

opportunities within these risks. Thus, there is a need to strategically manage the climate change risks; the key steps to strategically manage climate change risks are presented in Table 1 [1].

Some of the steps that are being taken by the steel industry to address climate change risks are presented as follows:

- Expand usage of current Energy – and CO<sub>2</sub>-efficient technologies in steel plants to minimize GHG emissions and energy consumption.
- Develop novel iron – and steelmaking technological solutions to significantly reduce specific energy consumption and specific GHG emission.
- Optimize and maximize recycling of steel scrap.
- Maximize value of steel industry by-products (wastes); recycling of steel plant wastes.
- Facilitate use of new generation of steels to improve energy efficiency of steel-using products in partnership with customers.

For a given site (location), it is necessary to select the best alternate ironmaking/steelmaking process technology(ies).

Table 1

**Key Steps to Strategically Manage Climate Change Risks [1]***Таблица 1. Основные шаги стратегического управления рисками изменения климата [1]*

| No | Steps Involved                                     | Details                                                                                                                                                                                                      |
|----|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Quantity Your Carbon “Footprint”                   | Quantify the sources and sinks of CO <sub>2</sub> within the business in order to commence the process of emissions management.                                                                              |
| 2  | Assess your Carbon Related Risks and Opportunities | Review the impact or opportunity within the following risks: regulatory, supply chain, product or technology, Litigation, Reputatio and physical. Understanding the risk is fundamental to managing the risk |
| 3  | Adapt your Business                                | Develop and implement activities to reduce energy consumption and carbon emissions. Identify how to seize new opportunities.                                                                                 |
| 4  | Do it Better than Rivals                           | Take the lead in reducing exposure to climate change risk and realising opportunities. Promote success to the market and legislators.                                                                        |

In the selection of the best-suited alternate iron-and steel making technologies for a given site, a two-step approach is adopted for delivering a good end-result [2]:

- The first step includes broad evaluation of all available site-specific information followed by short-listing of 2 to 3 potential process technologies based on risk analysis, simple pay back period calculation, as well as factored capital cost analysis and operating cost estimates. During this stage, a preset process of technical and economic analyses is applied to screen and filter all available technologies.
- The second step involves detailed financial analysis of the shortlisted process technologies, resulting in the final selection of the best-suited technology.

In the two-step selection process, market opportunities/weaknesses are also assessed to get an idea of expected steel demand, quality requirements, and price trends. On this basis, the appropriate (or the best) site-specific process technology is selected through a proper techno-economical evaluation of all potential technologies as well as considering the consolidated impact of technology, cost of production and transportation. The key evaluation metrics that are typically included in the evaluation and selection of process technology for a given site are presented in Table 2 [2].

Considering the significance of climate change risks for the highly energy- and carbon-intensive steel industry, it is necessary to evaluate the environmental aspects when considering an alternate process technology for implementation. This paper presents the results of an analysis conducted to compare the Energy Efficiency as well as GHG

emissions associated with the different process technologies that are relevant to the iron and steel industry.

**Process Modelling and Tools for Decision Support**

Modelling tools have been developed by Hatch to quantify potential energy savings and CO<sub>2</sub> abatement within the iron and steel industry [3] – the tool employed for abatement of greenhouse gas carbon is called G-CAPTM (Green-House Gas Carbon Abatement Process) while that employed for improving energy efficiency is called En-MAPTM (Energy Management Action Planning) [3]. These tools are based on formalized methodology for identifying, quantifying, and ranking the available GHG abatement/energy reduction opportunities in a steel plant, so that a holistic understanding of the magnitude and costs associated with the various reduction scenarios can be achieved. With the help of these tools, it has been possible to identify, with certainty, how much CO<sub>2</sub> emission and Energy Consumption can be abated by a defined point in time and at what cost to business. The G-CAPTM tool also has advanced features that allows setting of the initial CO<sub>2</sub> and

Table 2

**Key Evaluation Metrics for Techno-Economic Analysis [2]***Таблица 2. Ключевые параметры технико-экономического анализа [2]*

| Parameters                  | Details of the Evaluation Metrics                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Market Analysis             | Requirements of final steel product                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Raw Material                | Raw material requirement, its quality and availability                                                                                                                                                                                                                                      |
| Fuel and Energy             | Fuel requirement, types of fuels, availability, related quality                                                                                                                                                                                                                             |
| Process Technology Analysis | Principles of operation, concept flow-sheet, mass and energy balance, consumption figures, scaling principles, technical (feasibility) issues                                                                                                                                               |
| Risk Analysis               | Risks assessment with respect to scaling, state of the development of the technology, and complexity of operation                                                                                                                                                                           |
| Operating Cost              | Estimated operating cost based on key cost drivers and best practice operating conditions                                                                                                                                                                                                   |
| Capital Cost                | Estimated complete capital cost including core process units as well as infrastructure directly associated with process technology                                                                                                                                                          |
| Financial Analysis          | Detailed financial analysis including analyses of local tax and depreciation implications and analysis of sustainable maintenance – these aspects of project are evaluated utilizing an IRR / NPV estimate, based on discounted cash flow analyses and analysis of project financing impact |

energy reduction targets, negotiating the CO<sub>2</sub> cap allocation and managing the emission reduction pathway into the future. While the findings of G-CAPTM and En-MAPTM are generally applicable across the entire industry sectors, it is important to note that the calculations need to be customized on a plant-by-plant basis, due to variations in plant equipment, raw materials, and operations. The key elements of these tools are outlined as follow [3]:

1. Create inventory of all emission sources and sinks at site/business boundary level.
2. Disaggregate inventory to operating unit level.
3. Accuracy audit of disaggregated inventory, implement data quality improvements.
4. Establish a comprehensive Energy/Mass balance for each unit.
5. Collate operational key performance indicators (KPI's).
6. Identify Best-in-Similar-Class and Best Practice benchmarks.
7. Normalize units to benchmark conditions.
8. Identify abatement opportunities to compress the gap with the benchmark.

9. Expected Improvement with CO<sub>2</sub> Abatement/Energy Reduction Technologies.
10. Risk filter and eliminate unacceptable opportunities.
11. Model remaining opportunities and eliminate competing alternatives/suboptimal scenarios.
12. Develop operational cash cost (Opex), capital investment requirements (Capex), Abatement and lead time estimates for opportunities and generate MACC (Marginal Abatement Cost Curve) or MEEC (Marginal Energy Efficiency Curve).
13. Identify CO<sub>2</sub> price scenarios.
14. Map abatement and capital trajectories from MACC over time.
15. Set targets based on abatement cost/permit price differential.

A sample MACC is presented for reference in Figure 1. The MACC/MEEC allows a business to identify, with certainty, how much CO<sub>2</sub> emission or energy consumption can be abated by a defined point in time and at what cost to the business. The MACC is a well-developed tool for set-

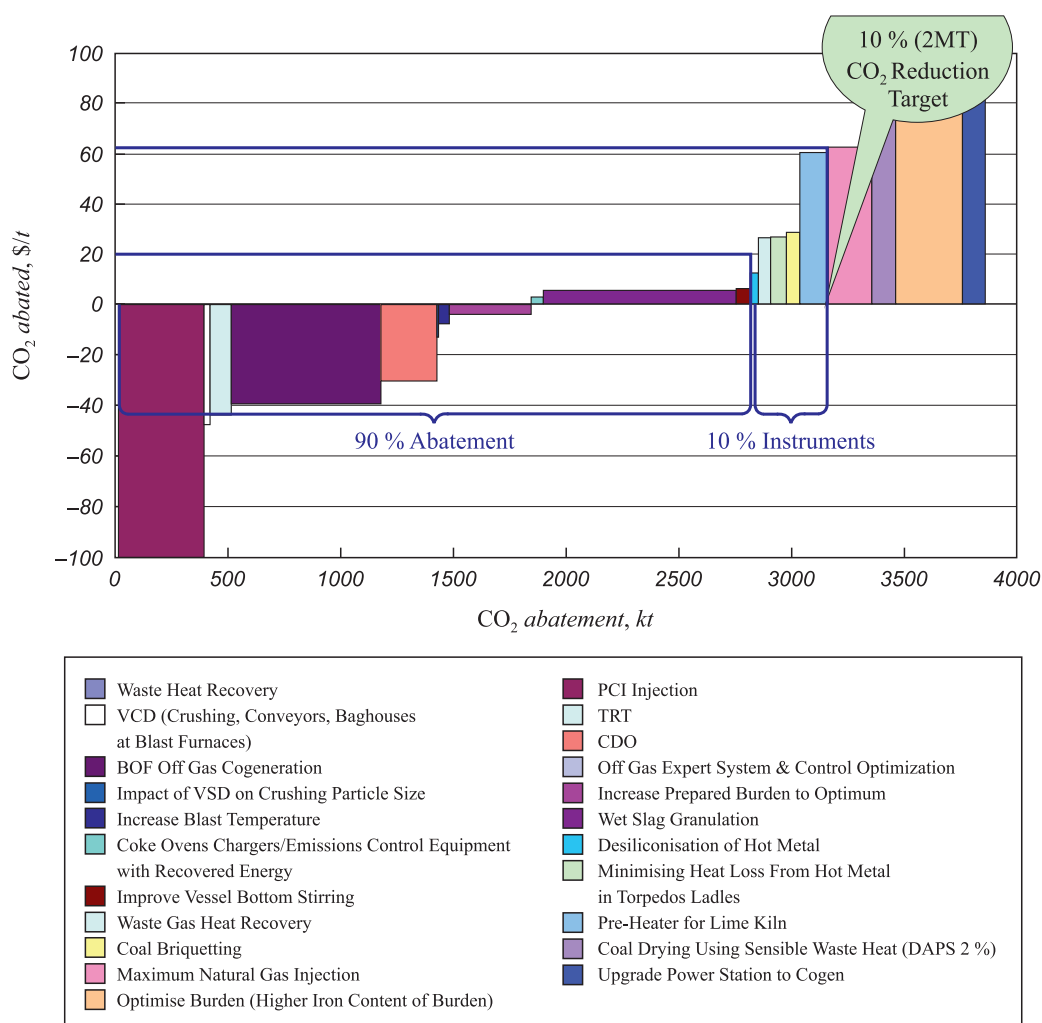


Fig. 1. Sample of Marginal Abatement Cost Curve (MACC) developed in a previous work [3]

Рис. 1. Пример кривой минимального снижения стоимости (MACC), разработанной в работе [3]

ting the initial CO<sub>2</sub> reduction targets, negotiating the CO<sub>2</sub> cap allocation and managing emission reduction pathway into the future. The MACC is equally relevant to identification of energy reduction initiatives. For developing MEEC, a sample of which is presented in Figure 2, calculation of abatement curve for energy reduction requires assessment of the basket of energy consumptions in a given steel plant.

The G-CAPTM/En-MAPTM tools have been applied in several steel companies to assess energy efficiency as well as GHG emissions associated with both existing operations as well as new processes.

### Evaluation of GHG Emissions and Energy Efficiency

A number of CO<sub>2</sub> abatement/Energy Efficiency technologies are being considered by steel plants in the different areas of iron and steelmaking. The abatement opportunities were estimated for certain selected technologies/initiatives for a range of site conditions and constraints imposed at the sites with respect to implementation. The expected range of improvements estimated for certain CO<sub>2</sub> abatement technologies/initiatives are presented in Table 3.

In addition to CO<sub>2</sub> abatement/energy efficiency technologies/initiatives that are being implemented by steel companies, there are a number of alternate ironmaking process technologies that are provide valuable options to steel companies in dealing with the current issues. While the conventional blast furnace ironmaking process is still widely implemented, a number of these alternate ironmaking processes are being considered for implementation.

Current status of some selected ironmaking process technologies are summarized in Table 4 [2].

Figure 3 presents some examples of future alternatives using the new ironmaking processes as well as the current options. Coal gasification technology allows usage of low-grade coal to produce a synthetic gas for DRI production; this option is especially useful in countries such as India where coal is available in plenty and there is limited natural gas availability.

In this work, the Energy Intensity (GJ/t) figures were estimated considering consumption and energy factors at the various stages of iron and steel production – this includes all Direct Emission Sources (e.g. coal, natural gas, heavy and light oil, etc.) as well as all Upstream Emission Sources (e.g. purchased electricity, oxygen, nitrogen, steam, coke, fluxes, etc.). Credits for Energy Sources that are produced within the steel plant and sold/transferred outside the plant boundaries (e.g. tar, slag, electricity), are subtracted.

The results of the analysis are presented in Table 5 (in terms of GJ/t of iron product, DRI or hot metal) and Table 6 (in terms of GJ/t of hot rolled product). It should be noted that end-product of these ironmaking technologies can be liquid hot metal, DRI or nuggets. The end product of rotary hearth and rotary kilns is DRI; but in the case of smelter option, the DRI is smelted and the final product is liquid hot metal (similar to that obtained from blast furnace).

The estimated energy intensity figures of Blast Furnace route compares well with those newer process technologies that have been widely adopted (such as Corex, Gas-based DRI – Midrex and Hyl). Only two developing ironmaking technologies, namely Romelt and Technored, have a supe-

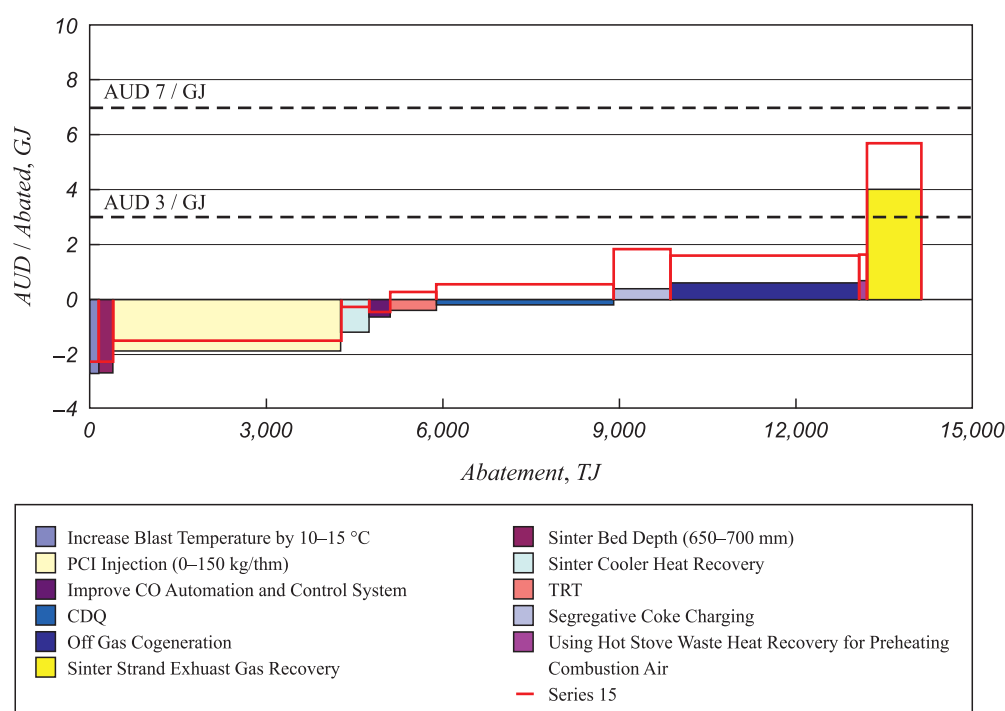


Fig. 2. Sample Marginal Energy Efficiency Curve (MEEC) developed in a previous work [3]

Рис. 2. Пример кривой минимальной энергетической эффективности (МЕЕС), разработанной в работе [3]

Table 3

### Range of Expected Improvements for some CO<sub>2</sub> Abatement Initiatives

Таблица 3. Диапазон ожидаемых улучшений по уменьшению CO<sub>2</sub> для некоторых технологий

| Technology                        | Plant | Savings in CO <sub>2</sub> kg/t (ls) |      | Constraint                                  |
|-----------------------------------|-------|--------------------------------------|------|---------------------------------------------|
|                                   |       | low                                  | high |                                             |
| Pulverised Coal Injection         | BF    | 25                                   | 66   | Oxygen requirements, Energy Balance         |
| Maximise natural gas injection    | BF    | 25                                   | 140  | As above                                    |
| Increase Blast Temperature        | BF    | 1.5                                  | 6    | Stove design                                |
| Top Gas Recovery Turbine          | BF    | 10                                   | 40   | BF design, top temperature                  |
| BOS off-gas recovery              | BOS   | 60                                   | 160  | Off-gas system, plant utilisation           |
| BOS waste heat boiler             | BOS   | 6.5                                  | 20   | Off-gas system                              |
| Upgrade power station             | ES    | 20                                   | 45   | Operational security                        |
| Sinter cooler waste heat recovery | SP    |                                      | 33   | Corrosion, impact on sinter quality         |
| Coke Dry Quenching                | CO    | 15                                   | 360  | High maintenance costs, offsets acceptable? |
| Coal drying                       | CO    | 16                                   | 60   | Steam requirements, maintenance             |

Table 4

### Current Status of Selected Ironmaking Technologies [2]

Таблица 4. Современное состояние рассматриваемых технологий производства железа [2]

| Ironmaking Process Technologies                | Current Status                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Blast Furnace Process                          | Most proven ironmaking technology with more than 1,000 installations in the world. Capacity of blast furnace ranges from 300,000 to 4,400,000 tpy of hot metal/pig iron                                                                                                                                                                                              |
| COREX® Process                                 | Capacity range from 800,000 to 1,500,000 tpy 6 installations in the world; hot metal, pig iron                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| Finex® Process                                 | One plant in operation at Posco, South Korea with 1,500,000 tpy hot metal capacity.                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Gas Based DRI Technologies (Midrex® and HYL®)  | Numerous installations exist in the world up to 1,900,000 tpy DRI                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Coal Based DRI Technologies (Midrex® and HYL®) | Only one prototype operating - utilizing a reducing gas with similar composition to the proposed synthetic gas from coal gasification – at Saldana Steel (ArcelorMittal), South Africa, Midrex® Megamodule. This plant uses reducing gas produced in a Corex® melter-gasifier. One plant is in operation and 2 more are in construction capacity up to 1,900,000 tpy |
| Rotary Kiln/ Smelter Combination               | Several industrial installations in the world. Examples include New Zealand Steel and Highveld (South Africa)                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Rotary Hearth/Smelter Combination              | Several installations in the world. Examples include Iron Dynamics (Indiana, USA) and Inmetco (USA). Three rotary hearth furnaces are in operation in Japan for waste treatment                                                                                                                                                                                      |
| ITmk3® Process                                 | The first industrial ITmk3® process plant is in commissioning stage and is expected to start routine operation in the summer of 2011. Two other plants are in the engineering and construction stages in USA and Kazakhstan. Capacity – 500,000 (nugget) tpy                                                                                                         |
| Tecnored® Process                              | Tecnored® Process is currently at demonstration plant stage (in Brazil) The plant has an annual design capacity of 300,000 tpy; <i>not yet proven on an industrial scale</i>                                                                                                                                                                                         |
| HIs melt® Process                              | The first and the only HIs melt® process industrial plant in Kwinana, Western Australia has been at ramp-up stage over the past several years; <i>not yet proven on an industrial scale</i>                                                                                                                                                                          |
| Romelt® Process                                | First industrial Romelt® plant (in Burma) is currently being constructed and is expected to have a design annual capacity of 200,000 tpy; <i>not yet proven on an industrial scale</i>                                                                                                                                                                               |

rior energy intensity footprint as compared to the current processes namely Blast Furnace, Corex and Gas-based DRI processes.

CO<sub>2</sub> emissions were also estimated for the various process technologies. The results are presented in Table 7 (in terms of t CO<sub>2</sub> per t of iron product, either liquid metal or

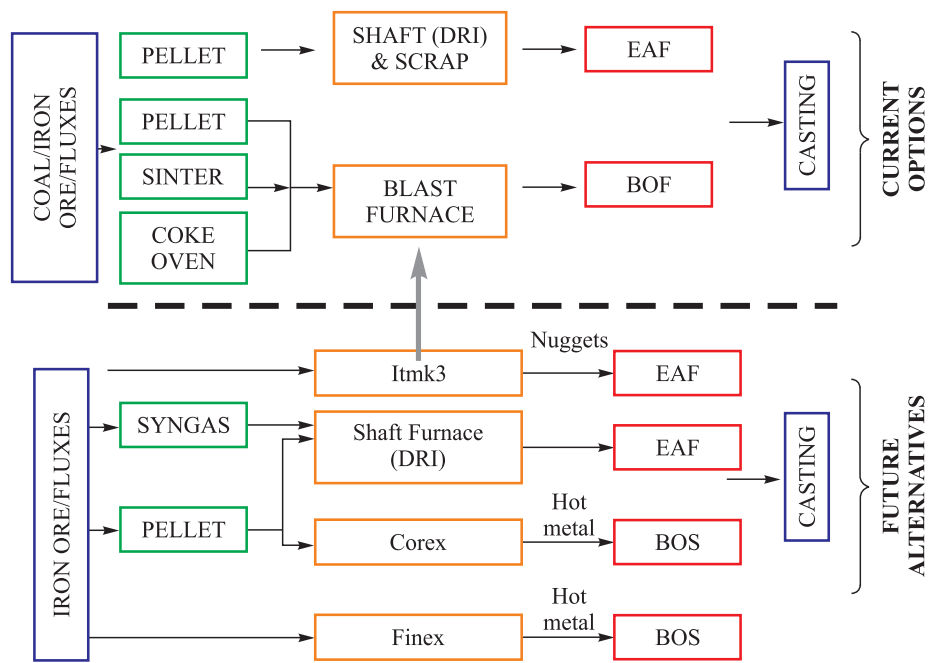


Fig. 3. Current options and future alternatives for iron and steel production

Рис. 3. Современные и будущие альтернативные технологии производства железа и стали

Table 5

**Estimated Energy Intensity for Process Technologies  
in terms of GJ per t Iron Product**

Таблица 5. Оценка энергоэффективности  
для рассматриваемых технологий, ГДж/т Fe

| Energy Intensity<br>(GJ/t Iron Product) | Process Technologies                                        |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| < 15.0                                  | Gas-based DRI (Midrex and HyL);<br>Romelt                   |
| > 15.0 to 17.5                          | Itmk3;<br>Coal-based DRI (Midrex and HyL);<br>Blast Furnace |
| > 17.5 to 20.0                          | Corex with Power Generation;<br>Hismelt                     |
| > 20.0 to 22.5                          | Corex with DRI Production;<br>Technored;<br>Finex           |
| > 22.5 to 25.0                          | Rotary Hearth with Smelter                                  |
| > 25.0                                  | Rotary Kiln with Smelter                                    |

Table 6

**Estimated Energy Intensity for Process Technologies  
in terms of GJ per t Hot Rolled Product**

Таблица 6. Оценка энергоэффективности для  
рассматриваемых технологий, ГДж/т горячего проката

| Energy Intensity<br>(GJ/t Iron Product) | Process Technologies                                                             |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| < 20.0                                  | Romelt;<br>Technored                                                             |
| > 20.0 to 22.5                          | Gas-based DRI (Midrex and HyL);<br>Corex with Power Generation;<br>Blast Furnace |
| > 22.5 to 25.0                          | Hismelt;<br>Itmk3                                                                |
| > 25.0 to 27.5                          | Finex;<br>Coal-based DRI                                                         |
| > 27.5 to 30.0                          | Corex with DRI Production;<br>Rotary Kiln with Smelter                           |
| > 30.0                                  | Rotary Kiln with Smelter                                                         |

solid DRI) and Table 8 (in terms of t CO<sub>2</sub> per t of hot rolled product).

On the basis of estimated CO<sub>2</sub> emissions, it is noted that Romelt and Technored processes have a better CO<sub>2</sub> footprint as compared to the conventional blast furnace route. In contrast to the newer process technologies (such as Corex®, Midrex® and HyL®) that are widely adopted in the industry, the performance of conventional blast furnace ironmaking route is found to be comparable. On the

other hand, performance of other developing technologies including Itmk3 and HiSmelt are found to be adverse as compared to Blast Furnace and the other technologies (Corex®, Midrex® and HyL®). Although coal-based DRI process can be a viable option for many regions (such as India) with large coal-deposits, this is expected to have an adverse CO<sub>2</sub> footprint. Similarly, rotary hearth and rotary kiln processes with smelter option, also have adverse CO<sub>2</sub> footprint.

Table 7

**Estimated CO<sub>2</sub> Emissions for Process Technologies in terms of t CO<sub>2</sub> per t Iron Product****Таблица 7. Выброс CO<sub>2</sub> для рассматриваемых технологий, т CO<sub>2</sub>/т Fe**

| CO <sub>2</sub> Emission (t CO <sub>2</sub> /t Iron Product) | Process Technologies                                         |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| < 1.00                                                       | Gas-based DRI (Midrex and HyL); Romelt                       |
| > 1.00 to 1.25                                               | Corex with Power Generation; Itmk3                           |
| > 1.25 to 1.50                                               | Blast Furnace; Technored                                     |
| > 1.50 to 1.75                                               | Coal-based DRI (Midrex and HyL); Hismelt                     |
| > 1.75 to 2.00                                               | Finex; Rotary Hearth with Smelter; Corex with DRI Production |
| > 2.00                                                       | Rotary Kiln with Smelter                                     |

**Summary and Conclusions**

Climate change is presenting new risks to the highly energy- and carbon-intensive, iron and steel industry. The industry needs to focus on reduction of energy consumption as well as green-house gas (GHG) emissions to address climate change. Development of alternate iron- and steelmaking process technologies can provide steel companies with economically-sustainable alternatives for steel production.

For managing climate change risks, novel modelling tools have been developed by Hatch to quantify and qualify potential energy savings and CO<sub>2</sub> abatement within the iron and steel industry. The tool developed for abatement of greenhouse gas carbon is called G-CAPTM (Green-House Gas Carbon Abatement Process) while that developed for improving energy efficiency is called En-MAPTM (Energy Management Action Planning). Evaluation of existing operations have shown that most integrated plants have GHG and energy abatement opportunities; on the other hand, the best-in-class plants may not have a lot of low-risk abatement opportunities left, even at high CO<sub>2</sub> price.

The traditional blast-furnace integrated route will continue to be a major process technology in the global steel industry (since this is a mature technology with a long history of optimization). In addition, its performance can be improved with the incorporation of available energy-savings and CO<sub>2</sub> abatement technologies.

The CO<sub>2</sub> footprint of the newer, widely-accepted processes including Corex and Gas-based DRI option (Midrex and HyL) is comparable to that of the conventional blast furnace ironmaking route. It was found that only two developing technologies (Romelt and Technored) have a superior

Table 8

**Estimated CO<sub>2</sub> Emissions in terms of t CO<sub>2</sub> per t of Hot Rolled Product****Таблица 8. Выброс CO<sub>2</sub> для рассматриваемых технологий, т CO<sub>2</sub>/т горячего проката**

| CO <sub>2</sub> Emission (t CO <sub>2</sub> /t Hot Rolled Product) | Process Technologies                                                        |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| < 1.50                                                             | Romelt; Technored                                                           |
| > 1.50 to 2.00                                                     | Gas-based DRI (Midrex and HyL); Corex with Power Generation; Blast Furnace  |
| > 2.00 to 2.50                                                     | Itmk3; Hismelt                                                              |
| > 2.50 to 3.00                                                     | Finex; Rotary Hearth with Smelter; Coal-based DR; Corex with DRI Production |
| > 3.00                                                             | Rotary Kiln with Smelter                                                    |

rior CO<sub>2</sub> footprint as compared to the process technologies in use today.

There are no currently available alternate iron- and steel-making technologies which can provide a significant (for example, over 20 %) reduction in GHG emissions or energy reduction versus a best-in-class conventional blast furnace ironmaking process route. Carbon capture and sequestration (CCS) on Gas-Based DRI processes, has the potential to emerge as a future technology that can provide large reduction in GHG emissions.

**REFERENCES**

1. Lash J., Wellington F. Competitive Advantage on a Warming Planet. *Harvard Business Review*, March 2007.
2. Gordon Y., Freislich M., Els J. Ironmaking Technology Selection for Site Specific Conditions. *AISTech 2010 Proceedings*. Vol. 1, pp. 519–528.
3. Kumar S., Freislich M., Mysko D., Westfall L.A., Bachenheimer S. Addressing Climate Change – A Novel Greenhouse Gas Carbon Abatement Process (G-CAP™) for the Iron and Steel Industry. *AISTech 2010 Proceedings*. Vol. 1, pp. 227–248.
4. Gordon Y., Freislich M., Brown R. Selection of ironmaking technology for existing specific conditions of European part of Russian Federation. *Proceedings of AISTech Conference*, Atlanta, GA, USA. 2012.
5. Gordon Y., Howey C. Implementation of new alternative ironmaking technologies: Experience and risk, Presented at *17th CIS Metals Summit*, Moscow, Russia. 2012.
6. Wheeler F., Twigg-Molecey C., McLean L. Managing the Risk of Implementing New Technologies. Presented at *the 36th Mechanical Working and Steel Processing Conference*. Baltimore, Maryland, USA. 1994.
7. Gordon Y. Role of an Engineering Consultancy in the Transformation of a Technology Idea to a Working Process Plant. *Proceedings of AISTech Conference*, Cleveland, OH, USA. 2015.

Received April 10, 2015

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗА И СТАЛИ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ИХ РАЗВИТИЯ

**Гордон Я.М.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор, технический директор  
департамента черной металлургии (igordon@hatch.ca)

**Кумар С.<sup>1</sup>**, директор отдела черной металлургии

**Фрейслич М.<sup>1</sup>**, менеджер по повышению производственной эффективности

**Ярошенко Ю.Г.<sup>2</sup>**, д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

<sup>1</sup> ООО «Хэтч» (Канада, ON L5K 2R7, Миссиссага, пр-д Спикман, 2800)

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

**Аннотация.** Современный изменяющийся рынок сырьевых материалов диктует необходимость разработки новых технологий производства чугуна, металлургического железа и стали, чтобы обеспечить дальнейшее устойчивое экономическое развитие металлургических предприятий. Одной из главных современных задач черной металлургии является сокращение потребления энергии и энергетических ресурсов и уменьшение выбросов парниковых газов в атмосферу, являющихся основным фактором изменения климата на Земле, что представляет сегодня новые риски для энергоемкой черной металлургии, потребляющей громадное количество углеродсодержащего топлива. Развитие и внедрение новых альтернативных технологий производства железа в какой-либо форме и стали может помочь металлургическим компаниям продолжить их устойчивую экономическую работу. Для того, чтобы контролировать изменения климата и риски, связанные с этим, Инженерно-консалтинговой компанией Хатч (Hatch) и Уральским федеральным университетом были разработаны новые технологии и методы моделирования для определения возможного сокращения энергопотребления и уменьшения выбросов диоксида углерода в атмосферу. Технология, позволяющая определять уменьшение выбросов диоксида углерода, была названа G-CAPT<sup>TM</sup> (Процесс сокращения выбросов парниковых газов), а технология улучшения топливно-энергетических показателей – En-MAPT<sup>TM</sup> (План управления энергопотреблением). Оценка работы многих металлургических предприятий показала наличие значительных ресурсов по сокращению выбросов парниковых газов и уменьшения потребления энергии. С другой стороны, предприятия с лучшими показателями работы вероятно уже исчерпали возможности внедрения мероприятий с малым экономическим

риском даже в условиях значительной стоимости платы за выбросы диоксида углерода в атмосферу. В этих условиях совершенно необходимо оценить все риски, связанные с разработкой и внедрением новых металлургических технологий. В данной работе представлен сравнительный анализ энергетической эффективности и эффективности снижения выбросов парниковых газов в атмосферу для ряда металлургических процессов, внедряемых в промышленность в настоящее время или близких к внедрению. Разработанные технологии G-CAPT<sup>TM</sup> и En-MAPT<sup>TM</sup> были использованы для количественной и качественной оценки возможностей снизить энергетические затраты и выбросы парниковых газов.

**Ключевые слова:** доменное производство, альтернативные металлургические технологии, плавление, железо прямого получения, горячебрикетированное железо, нагетты (гранулы), чугун, выброс технологии.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-630-637

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lash J., Wellington F. Competitive Advantage on a Warming Planet. *Harvard Business Review*, March 2007.
2. Gordon Y., Freislich M., Els J. Ironmaking Technology Selection for Site Specific Conditions. *AISTech 2010 Proceedings*. Vol. 1, pp. 519–528.
3. Kumar S., Freislich M., Mysko D., Westfall L.A., Bachenheimer S. Addressing Climate Change – A Novel Greenhouse Gas Carbon Abatement Process (G-CAPT<sup>TM</sup>) for the Iron and Steel Industry. *AISTech 2010 Proceedings*. Vol. 1, pp. 227–248.
4. Gordon Y., Freislich M., Brown R. Selection of ironmaking technology for existing specific conditions of European part of Russian Federation. *Proceedings of AISTech Conference*, Atlanta, GA, USA. 2012.
5. Gordon Y., Howey C. *Implementation of new alternative ironmaking technologies: Experience and risk*, Presented at 17th CIS Metals Summit, Moscow, Russia. 2012.
6. Wheeler F., Twigge-Molecey C., McLean L. Managing the Risk of Implementing New Technologies. Presented at the 36th Mechanical Working and Steel Processing Conference. Baltimore, Maryland, USA. 1994.
7. Gordon Y. Role of an Engineering Consultancy in the Transformation of a Technology Idea to a Working Process Plant. *Proceedings of AISTech Conference*, Cleveland, OH, USA. 2015.

Получено 10 апреля 2015 г.

УДК 669.18

## АНАЛИЗ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ КОВШЕВОМ РАФИНИРОВАНИИ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ ГАЗОВОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ\*

**Бурмасов С.П.<sup>1</sup>**, к.т.н., профессор кафедры «Металлургия железа и сплавов»

**Гудов А.Г.<sup>1</sup>**, к.т.н., доцент кафедры «Металлургия железа и сплавов» (a.g.gudov@urfu.ru)

**Ярошенко Ю.Г.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

**Мелинг В.В.<sup>2</sup>**, старший мастер участка внепечной обработки стали

**Дресвянкина Л.Е.<sup>2</sup>**, начальник группы внепечной обработки металлургической лаборатории НИЦ

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

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

<sup>2</sup> ОАО «Северский трубный завод»

(623388, Россия, Свердловская обл., Полевской, ул. Вершинина, 7)

**Аннотация.** Актуальность задачи интенсификации рафинировочных процессов при ковшовой обработке стали и повышения производительности современного сталеплавильного производства в целом выдвигают проблему аналитического описания массообменных процессов при рафинировании металла в условиях газового перемешивания, являющегося основным на современном этапе. Анализ производственных данных с привлечением имеющейся информации и моделей не позволил сделать вывод об адекватности реальным условиям. В работе приведены методические подходы и результаты оценки объемного коэффициента массопереноса как обобщенного показателя, определяющего динамику рафинирования металла в условиях газового перемешивания. На базе большого массива промышленных данных по шлаковой десульфурации низко- и среднеуглеродистого металла на установке ковш-печь и вакуумной деазотации на установке VD с привлечением разработанных моделей перемешивания и рафинирования получены новые соотношения, связывающие интенсивность продувки перемешивающим газом с величиной объемного коэффициента массопереноса как для условий открытых процессов ковшовой обработки, так и для вакуумной дегазации. Приводятся результаты проверки адекватности предложенных моделей рафинирования на основе полученных соотношений связи интенсивности продувки и показателей массопереноса, показавшие достаточное соответствие рекомендованных режимов и достигнутой эффективности рафинирования.

**Ключевые слова:** ковшевая обработка, десульфурация, дегазация, динамика, газовое перемешивание, массоперенос, объемный коэффициент массопереноса, интенсивность продувки, модель, адекватность.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-638-644

В условиях современной технологической схемы сталеплавильного производства качество стали определяется, прежде всего, эффективностью внепечного рафинирования. При этом ключевыми технологическими задачами внепечной обработки являются десульфурация и дегазация металла. Решение этих задач в условиях современных сталеплавильных процессов связано:

- с одной стороны, с необходимостью постоянно повышения глубины удаления нежелательных примесей в условиях непрерывного возрастания требований к качеству стали;
- с другой стороны, с необходимостью интенсификации процессов вследствие жестких ограничений на время обработки из-за напряженной логики технологической схемы.

С учетом того, что в качестве основного направления повышения эффективности сталеплавильного производства в настоящее время рассматривается увеличение производительности за счет сокращения про-

должительности технологических этапов, второй аспект приобретает все большее значение.

Скорость процессов внепечного рафинирования определяется скоростью массообмена между металлом и рафинировочными средами. Исходя из диффузионного режима процессов, динамика изменения концентрации примеси в металле определяется соотношением

$$\ln \frac{[X] - [X]_{\text{равн}}}{[X]_0 - [X]_{\text{равн}}} = -k_V \tau, \quad (1)$$

где  $[X]_0$  – начальное содержание примеси в металле, %;  $[X]_{\text{равн}}$  – равновесная концентрация примеси, определяемая термодинамическими условиями, %;  $[X]$  – фактическая концентрация примеси, %;  $\tau$  – время от начала процесса, с;  $k_V$  – объемный коэффициент массопереноса, с<sup>-1</sup>.

$$k_V = k \frac{S}{V}, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент массопереноса, м·с<sup>-1</sup>;  $S$  – площадь поверхности раздела, м<sup>2</sup>;  $V$  – объем металла, м<sup>3</sup>.

\* Работа выполнена по поддержке гранта РФФИ № 13-08-12167.

При этом зависимость текущего содержания примеси в металле от времени обработки имеет вид

$$[X] = [X]_{\text{равн}} + ([X]_0 - [X]_{\text{равн}}) \exp(-k_V \tau). \quad (3)$$

В этих условиях фактическая эффективность процессов внепечного рафинирования во многом определяется величиной объемного коэффициента массопереноса. При наличии жестких ограничений на продолжительность процесса величина коэффициента определяет степень реализации рафинировочного потенциала термодинамических условий внепечной обработки.

Как правило, в расчетах ковшевого рафинирования в условиях газового перемешивания величина объемного коэффициента массопереноса оценивается на основе эмпирических соотношений, в частности обобщенного соотношения, предложенного Янгом, Юном и Лю [1]:

$$K_V = 0,0125 \dot{\epsilon}^{0,817}, \text{ с}^{-1}, \quad (4)$$

где  $\dot{\epsilon}$  – удельная мощность перемешивания, Вт/кг.

При этом оценка удельной мощности перемешивания встречает определенные трудности, поскольку имеющаяся в литературных источниках информация содержит, как правило, высокую долю привязки к конкретным процессам [2]. Авторами получено аналитическое соотношение для условий газового перемешивания как в открытых, так и вакуумных процессах:

$$\dot{\epsilon} = G \frac{P_0 T}{273} \ln \frac{P + \rho g H}{P}, \quad (5)$$

где  $G$  – удельная интенсивность продувки, м<sup>3</sup>/(кг·с);  $P_0$  – давление газа при нормальных условиях, Па;  $P$  – фактическое давление над металлом, Па;  $T$  – температура металла, К.

Сравнительный анализ результатов расчета по приведенным выше соотношениям с фактическими данными для условий внепечного рафинирования в ковше емкостью 140 т металла с двумя продувочными блоками, расположенными в одной половине ковша, свидетельствует, что фактические темпы десульфурации при шлаковом рафинировании в условиях атмосферного давления и темп деазотации в вакууме в большинстве случаев превышают расчетные значения.

В связи с этим авторами была предпринята попытка получить эмпирические соотношения для расчета объемного коэффициента массопереноса, наиболее адекватно описывающие динамику ковшевого рафинирования металла в условиях открытых процессов и в вакууме.

Для получения зависимости в условиях открытых процессов был проанализирован значительный объ-

ем промышленных данных по десульфурации шлаком низко- и среднеуглеродистого металла на установке ковш-печь. Объемный коэффициент массопереноса в каждом случае оценивали, решая уравнение (1) относительно  $K_V$  при известных из эксперимента значениях начальной и конечной концентраций примеси:

$$K_V = \frac{\ln \frac{[S]_0 - [S]_{\text{равн}}}{[S] - [S]_{\text{равн}}}}{\tau}. \quad (6)$$

При этом основную проблему использования уравнения (6) для оценки  $K_V$  составляло нахождение в каждом конкретном случае равновесного значения содержания примеси в металле. Задачу нахождения равновесного значения содержания серы, входящего в уравнение (6), решали на основе полученного из балансовых представлений соотношения

$$[S]_{\text{равн}} = \frac{[S]_{\text{нач}}}{1 + \lambda L_S}, \quad (7)$$

где  $[S]_{\text{нач}}$  – концентрация серы в полупродукте, %;  $\lambda$  – кратность шлака, доли;  $L_S$  – равновесный коэффициент распределения серы между металлом и шлаком, который, в свою очередь, определяли из условий равновесия в системе «металл–шлак–газовая фаза» по сере и кислороду, исходя из зависимости [3]

$$L_S = C_S P_{\text{O}_2}^{-1/2} \gamma_{[S]} \frac{1}{K_{[S]}}, \quad (8)$$

где  $C_S$  – сульфидная емкость шлака;  $p_{\text{O}_2}$  – окислительный потенциал системы «металл–шлак»;  $\gamma_{[S]}$  – коэффициент активности серы в металле;  $K_{[S]}$  – константа равновесия реакции  $1/2 \{S_2\} = [S]$ .

Сульфидную емкость шлака оценивали термодинамически из соотношения

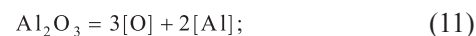
$$C_S = K_{(S)} a_{\text{O}^{2-}}, \quad (9)$$

для которого температурная зависимость константы  $K_{(S)}$  была получена в виде

$$\lg K_{(S)} = -\frac{4813,2}{T} + 0,2475. \quad (10)$$

Активность анионов кислорода в шлаке  $a_{\text{O}^{2-}}$ , входящую в соотношение (9) и объективно определяющую основность шлаков, отождествляли с ионной долей и рассчитывали с использованием аппарата полимерной модели оксидных расплавов [4].

При расчетах  $p_{\text{O}_2}$  исходили из того, что в условиях агрегата ковш-печь окислительный потенциал системы определяется алюминием и может быть рассчитан из равновесий



$$1/2\{O_2\} = [O] \quad (12)$$

с использованием соотношений

$$\lg[O] = \frac{1}{3} \lg K'_{Al_2O_3} - \frac{2}{3} \lg[Al] + 5,25[Al] + \frac{1}{3} \lg a_{Al_2O_3} \quad [5]; \quad (13)$$

$$p_{O_2} = 10^{2\left(\lg[O] - \frac{6114}{T} - 0,151\right)} \quad [6], \quad (14)$$

где  $K'_{Al_2O_3}$  – константа равновесия реакции (11).

Активность продуктов раскисления в условиях интенсивного перемешивания металла и шлака отождествляли с активностью  $Al_2O_3$  в рафинировочных шлаках и оценивали в соответствии с представлениями полимерной модели оксидных расплавов [4].

При решении элементов модели (7) – (10), (13) и (14) для конкретных значений температуры, количества и состава металла и шлака были учтены различия термодинамических условий десульфурации в ковше в условиях газового перемешивания для исследованных плавок. Наиболее важные показатели рафинировочных свойств шлаков, проконтролированных при исследовании плавок, приведены на рис. 1.

Полученные значения объемного коэффициента массопереноса для каждой плавки были поставлены в соответствие усредненным за время рафинирования значениям интенсивности продувки инертным газом (табл. 1).

В результате было получено эмпирическое соотношение, позволяющее оценить величину объемного ко-

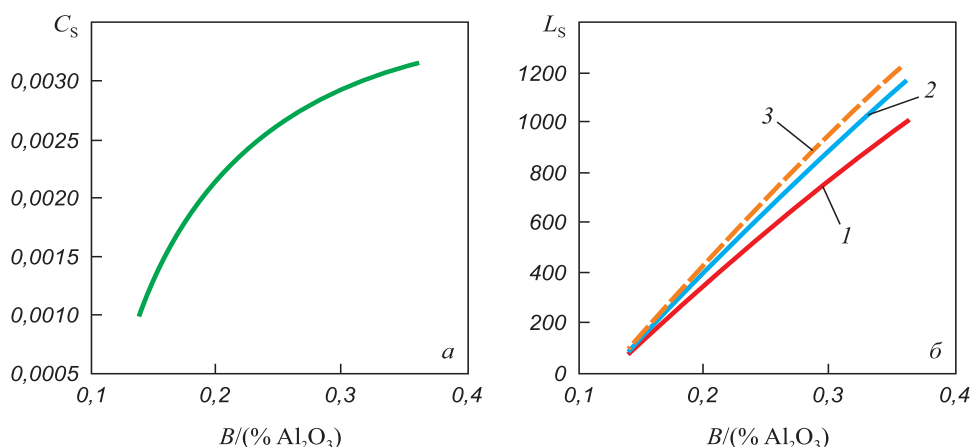


Рис. 1. Зависимость сульфидной емкости (а) и коэффициента распределения серы между металлом и шлаком (б) от состава рафинировочных шлаков при 1600 °С ( $B$  – показатель основности,  $CaO/SiO_2$ ) при  $[Al]$ , %: 1 – 0,002; 2 – 0,003; 3 – 0,004

Fig. 1. Dependence of sulfide capacity (a) and sulfur distribution ratio between metal and slag (b) from composition of refining slags at 1600 °С ( $B$  – basicity of slag,  $CaO/SiO_2$ ) at  $[Al]$ , %: 1 – 0.002; 2 – 0.003; 3 – 0.004

Таблица 1

**Параметры десульфурации в ковше в условиях газового перемешивания для исследованных плавок**

**Table 1. Parameters of desulfurization in the ladle at gas mixing for the investigated heats**

| Номер п/п | $T$ , К | $B$ | $B/(Al_2O_3)$ | $C_s$  | $a_{(Al_2O_3)}$ | $[Al]$ , % | $P_{O_2} \cdot 10^{12}$ , Па | $L_s$ | $[S]_{п/п-г}$ , % | $[S]_{равн}$ , % | $K_V \cdot 10^3$ , с <sup>-1</sup> | $Q_{Ar} \cdot 10^3$ , м <sup>3</sup> /с |
|-----------|---------|-----|---------------|--------|-----------------|------------|------------------------------|-------|-------------------|------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1         | 1844    | 4,0 | 0,24          | 0,0022 | 0,00038         | 0,025      | 7,20                         | 759   | 0,072             | 0,004            | 1,198                              | 5,953                                   |
| 2         | 1842    | 4,8 | 0,24          | 0,0022 | 0,00039         | 0,026      | 6,57                         | 814   | 0,071             | 0,0036           | 1,037                              | 4,318                                   |
| 3         | 1850    | 6,0 | 0,31          | 0,0026 | 0,00024         | 0,031      | 5,77                         | 1036  | 0,077             | 0,0031           | 1,087                              | 3,411                                   |
| 4         | 1838    | 5,6 | 0,26          | 0,0024 | 0,00032         | 0,025      | 5,41                         | 951   | 0,078             | 0,0034           | 1,158                              | 4,615                                   |
| 5         | 1846    | 5,7 | 0,30          | 0,0026 | 0,00022         | 0,019      | 6,71                         | 935   | 0,057             | 0,0025           | 0,625                              | 3,543                                   |
| 6         | 1838    | 4,7 | 0,24          | 0,0021 | 0,00041         | 0,019      | 7,59                         | 702   | 0,064             | 0,0037           | 1,168                              | 4,664                                   |
| 7         | 1858    | 4,6 | 0,26          | 0,0024 | 0,00030         | 0,02       | 12,16                        | 668   | 0,071             | 0,0043           | 1,110                              | 7,995                                   |
| 8         | 1849    | 5,3 | 0,27          | 0,0025 | 0,00027         | 0,026      | 6,74                         | 891   | 0,074             | 0,0034           | 1,445                              | 7,775                                   |
| 9         | 1859    | 4,2 | 0,24          | 0,0024 | 0,00034         | 0,015      | 18,04                        | 523   | 0,035             | 0,0027           | 1,225                              | 8,613                                   |
| 10        | 1858    | 4,8 | 0,25          | 0,0022 | 0,00047         | 0,016      | 20,16                        | 472   | 0,034             | 0,003            | 0,965                              | 6,778                                   |

эфициента массопереноса, исходя из интенсивности продувки инертным газом:

$$K_V = 0,0069 Q_{Ar}^{0,3571}, \text{ с}^{-1}, \quad (15)$$

где  $Q_{Ar}$  – интенсивность продувки инертным газом,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Сравнительный анализ результатов расчета значений объемного коэффициента массопереноса для условий открытых процессов по зависимостям (4) и (15) позволяет отметить их близость при больших интенсивностях продувки инертным газом (порядка  $0,0135 \div 0,015 \text{ м}^3/\text{с}$ ) и значительное различие при относительно небольших интенсивностях (рис. 2). Величина  $K_V$ , рассчитанная по полученному авторами соотношению, превышает величину объемного коэффициента массопереноса, рассчитанную по соотношению (4), в 1,4 раза при интенсивности продувки инертным газом  $0,0067 \text{ м}^3/\text{с}$  и в 1,6 раза при интенсивности  $0,005 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Уточнение эмпирической зависимости коэффициента объемного массопереноса от интенсивности продувки инертным газом позволило адаптировать приведенную выше модель десульфурации шлаком в ковше для конкретных технологических условий. Сделанное на рис. 3 сопоставление фактических промышленных данных и результатов расчета по соотношению (3) с использованием зависимости (15) указывает на достаточную адекватность описания фактической динамики десульфурации при обработке шлаком.

Проведенный с помощью усовершенствованной модели анализ условий десульфурации стали шлаком в 140-т ковше позволил сделать вывод, что для полной реализации условий рафинирования за время не более 3600 с требуется интенсивность продувки инертным га-

зом не менее  $0,0167 \text{ м}^3/\text{с}$ . Это подтверждается промышленными данными.

Вакуумирование в ковше в условиях газового перемешивания, как правило, характеризуется существенно меньшими расходами инертного газа при достаточно высокой интенсивности перемешивания, фиксируемой визуально. Это согласуется с влиянием понижения давления над металлом на зависимость удельной мощности перемешивания от удельной интенсивности продувки, которое следует из соотношения (5): при той же интенсивности продувки понижение внешнего давления с  $1,01 \cdot 10^5$  до  $1,01 \cdot 10^2$  Па увеличивает удельную мощность перемешивания в 4,766 раз.

Адекватность математического описания условий массопереноса при ковшевом вакуумировании изучалась для условий 140-т ковша с двумя продувочными блоками при остаточном давлении в вакуумной камере около  $1,01 \cdot 10^2$  Па. Поскольку при вакуумной дегазации стали наибольшие трудности вызывает удаление азота, основное внимание было сосредоточено на процессе деазотации.

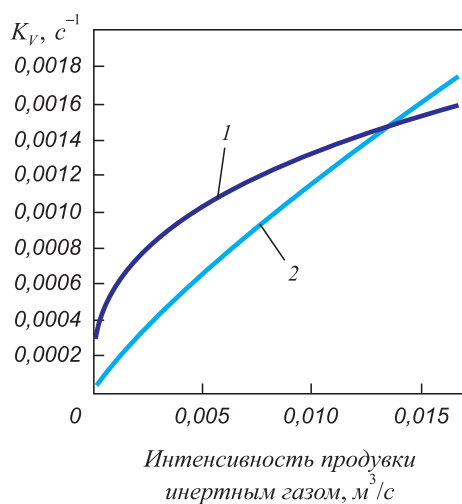


Рис. 2. Сравнение результатов расчета объемного коэффициента массопереноса по полученной эмпирической зависимости (15) – 1 и соотношению (4) – 2

Fig. 2. Comparison of calculation results of volume mass transfer factor by empirical dependence (15) – 1 and formula (4) – 2

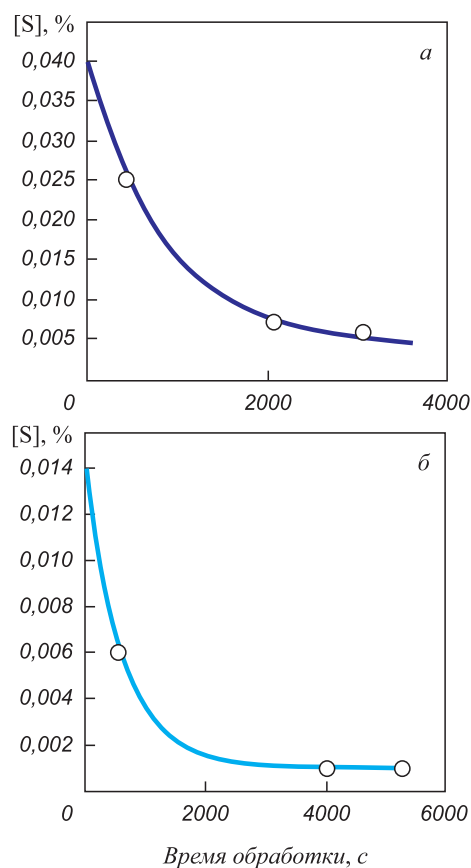


Рис. 3. Сопоставление фактических данных и результатов расчета десульфурации стали шлаком в ковше в условиях газового перемешивания: точки – фактические промышленные данные, линии – результаты расчета; а, б – различные плавки

Fig. 3. Comparison of industrial data and calculation results of steel desulfurization by slag in a ladle in conditions of gas stirring: dots – industrial data, lines – calculation results; a, б – different melts

С учетом роли поверхностных явлений при десорбции газов в уравнение (1) динамики деазотации при обработке на установке вакуумирования стали должна быть внесена поправка в виде [7]

$$(1 - \theta) = \frac{1}{4 + 620[S]}, \quad (16)$$

характеризующая долю свободной поверхности в присутствии поверхностно-активной серы. Тогда зависимость текущего содержания азота в металле от времени обработки принимает вид

$$[N] = [N]_{\text{равн}} + ([N]_0 - [N]_{\text{равн}}) \exp[-K_V (1 - \theta) \tau]. \quad (17)$$

Для анализа были взяты плавки, у которых известны:

- интенсивность подачи инертного газа под глубоким вакуумом (оценивалась по диаграммам расхода инертного газа);
- содержание азота в металле непосредственно до и после вакуумной обработки.

Равновесную концентрацию азота оценивали по закону Сиверта, исходя из промышленных данных по температуре и максимальному разрежению. Для каждой плавки была сделана оценка фактического значения объемного коэффициента массопереноса. Затем в результате регрессионного анализа было получено соотношение, связывающее фактический объемный коэффициент массопереноса и фактическую интенсивность подачи инертного газа под глубоким вакуумом:

$$K_V = 1,267 Q_{\text{Ar}}, \text{ c}^{-1}. \quad (18)$$

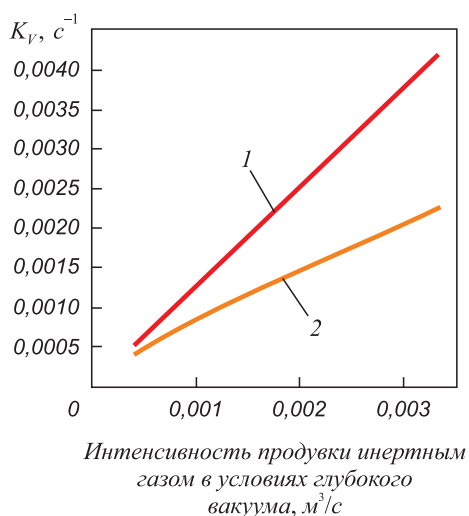


Рис. 4. Сравнение результатов расчета объемного коэффициента массопереноса по полученной эмпирической зависимости (18) – 1 и соотношению (4) – 2 для условий вакуума

Fig. 4. Comparison of calculation results of volume mass transfer factor according to found empirical dependent (18) – 1 and formula (4) – 2 for vacuum conditions

Сравнительный анализ результатов расчета значений коэффициента объемного массопереноса для условий вакуума по зависимостям (4) и (18) позволяет отметить, что величина  $K_V$ , рассчитанная по полученной авторами эмпирической зависимости, превосходит величину, рассчитанную по соотношению (4). При этом с увеличением интенсивности продувки степень различий возрастает (рис. 4): при интенсивности продувки инертным газом  $8,33 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$  расчет по вновь полученному соотношению дает результат в 1,46 раза больше, при расходе  $1,67 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  – в 1,65 раза.

Сопоставление расчетных и фактических концентраций азота после вакуумирования, сделанное в табл. 2, свидетельствует, что новое соотношение для оценки объемного коэффициента массопереноса существенно повысило адекватность описанной выше модели: в большинстве случаев величина расхождения не превышала 10 %.

С использованием нового эмпирического соотношения для определения объемного коэффициента массопереноса авторами была сделана расчетная оценка степени деазотации в зависимости от интенсивности продувки инертным газом в условиях глубокого вакуума при остаточном давлении  $1,01 \cdot 10^2 \text{ Па}$ , температуре 1873 К и продолжительности вакуумирования 900 с (рис. 5). Полученные результаты в целом согласуются с промышленными данными.

Таким образом, в условиях современного сталеплавленного производства при необходимости сочетания сокращения продолжительности и увеличения глубины внепечного рафинирования фактор интенсификации массообменных процессов приобретает первостепенное значение. Полученные эмпирические зависимости объемного коэффициента массопереноса от интенсивности продувки инертным газом могут способствовать выработке оптимальных режимов газового перемешивания при внепечном рафинировании стали в ковше.

Таблица 2

**Сопоставление фактических и расчетных концентраций азота после вакуумирования**

Table 2. Comparison of actual and calculated concentrations of nitrogen after evacuation

| Номер плавки | Фактическая концентрация азота, ppm | Расчетная концентрация азота, ppm | Величина отклонения, % |
|--------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| 1            | 57,4                                | 52,0                              | – 9,3                  |
| 2            | 55,8                                | 54,3                              | – 2,7                  |
| 3            | 44,6                                | 51,4                              | 15,3                   |
| 4            | 45,7                                | 49,6                              | 8,7                    |

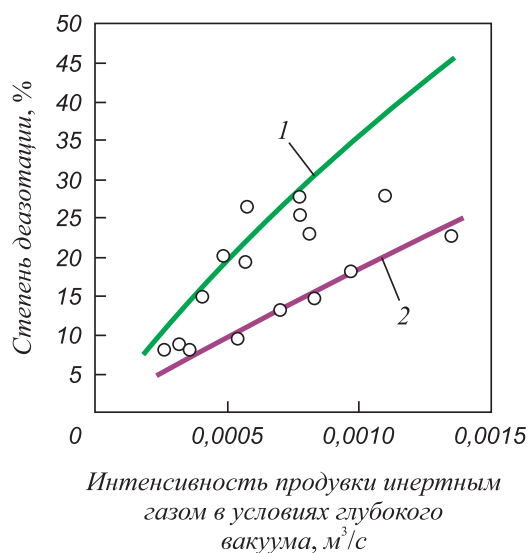


Рис. 5. Зависимость степени деазотации от интенсивности продувки инертным газом под глубоким вакуумом. Линии – расчетные зависимости при остаточном давлении  $1,01 \cdot 10^2$  Па, температуре 1873 К и продолжительности вакуумирования 900 с и [S], %: 1 – 0,002, 2 – 0,006. Точки – промышленные данные при времени вакуумирования 780 ÷ 1020 с и содержании серы в металле 0,002 ÷ 0,006 %

Fig. 5. Dependence of nitrogen removal from inert gas stirring rate under deep vacuum. Lines – calculated dependence at residual pressure  $1,01 \cdot 10^2$  Pa, temperature 1873 K and degassing time 900 sec. and [S], %: 1 – 0.002, 2 – 0.006 %. Dots – industrial data for degassing time 780 ÷ 1020 sec. and sulfur content in metal 0.002 ÷ 0.006 %

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Янг Ку, Юн Лианг, ЛюЛю. Исследование на модели процессов перемешивания и массопереноса при ковшевой продувке // Тр. конф. «Инжекционная металлургия '83» (Лулеа, Швеция, 15 – 17 июня 1983 г.) / Пер. с англ. под ред. М.Ф. Сидоренко. – М.: Металлургия, 1986. С. 135 – 146.
2. Сано М., Мори К. Модель циркуляционного течения в расплавленном металле для специального случая барботажа ванны и ее применение к процессам инжектирования газа // Тр. конф. «Инжекционная металлургия '83» (Лулеа, Швеция, 15 – 17 июня 1983 г.) / Пер. с англ. под ред. М.Ф. Сидоренко. – М.: Металлургия, 1986. С. 124 – 134.
3. Бурмасов С.П. Технологические аспекты проблемы качества стали // Вестник ГОУ УГТУ-УПИ. Теплотехнические и технологические проблемы производства стали: Тр. науч.-техн. конф., посвященной 98-летию со дня рождения заслуженного изобретателя РСФСР, профессора Н.И. Кокарева. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002. С. 50 – 58.
4. Новиков В. К. Развитие полимерной модели силикатных расплавов // Расплавы. 1987. Т. 1. № 6. С. 21 – 23.
5. Бурмасов С.П., Гудов А.Г., Панфилов А.М. Внепечное рафинирование стали в условиях газового перемешивания: методические указания к выполнению инженерных расчетов внепечной обработки стали. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 37 с.
6. Эллиот Д.Ф., Глейзер М., Рамакришна В. Термохимия сталеплавильных процессов. – М.: Металлургия, 1969. – 252 с.
7. Шахин М.А., Эль-Никхайли А., Эль-Зеки М. Перемешивание жидкого металла продувкой азотом в ковше. Применение, ограничения, контроль // Тр. IV Междунар. конф. по инжекционной металлургии «Инжекционная металлургия'86» (Лулеа, Швеция, 11 – 13 июня 1986 г.) / Пер. с англ. под ред. В.А. Кудрина. – М.: Металлургия, 1990. С. 146 – 156.

Поступила 7 апреля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 9, pp. 638–644.

## THE ANALYSIS OF MASS TRANSFER IN CONDITIONS OF GAS STIRRING AT LADLE REFINING OF STEEL

**Burmasov S.P.<sup>1</sup>**, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metallurgy of Iron and Alloys”

**Gudov A.G.<sup>1</sup>**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metallurgy of Iron and Alloys” (a.g.gudov@urfu.ru)

**Yaroshenko Yu.G.<sup>1</sup>**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

**Meling V.V.<sup>2</sup>**, Chief Foreman of the Section of Steel Ladle Treatment

**Dresvyankina L.E.<sup>2</sup>**, Head of the Ladle Treatment Group at Metallurgical Laboratory of R&D Centre

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

<sup>2</sup> JSC “Severskii Tube Steelworks” (7, Vershinina str., Polevskoi, Sverdlovsk region, 623388, Russia)

**Abstract.** The intensification of steel refining at ladle treatment and improvement of production efficiency of modern steelmaking require the analytical description of mass transfer in conditions of gas stirring at ladle refining. The analysis of industrial data on the basis of standard models does not allow to describe adequately the real processes. The methods and results of estimation of mass transfer volume factor which can be considered as a key factor for dynamics of steel refining in conditions of gas stirring are presented in the paper. The analysis of

industrial data on desulfurization of low- and medium-carbon metal at furnace-ladle (EAF) and vacuum degassing unit (VD) was made on the basis of proposed models of gas stirring and refining. New data on the correlation of stirring rates and volume mass transfer factor were found for EAF and VD processes of steel treatment. The adequacy of proposed models of refining processes was tested on the basis of correlation data on gas stirring rate and mass transfer factor and confirmed a good agreement with recommended process parameters and archived refining efficiency.

**Keywords:** ladle treatment, desulfurization, degassing, dynamics, gas stirring, mass transfer, volume factor of mass transfer, stirring rate, model, adequacy.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-638-644

## REFERENCES

1. Yang Ku, Yun Liang, Lyu Lyu A model study of mixing and mass transfer in ladle injection. In: *3rd Int. Conf. on refining of iron and steel by powder injection*, Lulea, Sweden, June 15–17, 1983. Proceedings. Sweden: MEPOS, 1983.
2. Sano M., Mori K. Circulating flow model in a molten metal bath with special respect to behavior of bubble swarms and its application to gas injection processes. In: *3rd Int. Conf. on refining of iron and steel by powder injection*, Lulea, Sweden, June 15–17, 1983. Proceedings. Sweden: MEPOS, 1983.

3. Burmasov S.P. Technological aspects of the steel quality. *Vestnik GOU UGTU-UII. Teplotekhnicheskie i tekhnologicheskie problemy proizvodstva stali: Trudy nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posvyashchennoi 98-letiyu so dnya rozhdeniya zaslužennogo izobretatelya RSFSR, professora N.I. Kokareva* [Vestnik GOU UGTU-UII. Thermal and technological problems of steel production: Proceedings of scientific conference devoted to the 98 anniversary of Honored Inventor of the RSFSR, professor Kokarev N.I.]. Ekaterinburg: UGTU-UII, 2002, pp. 50–58. (In Russ.).
  4. Novikov V. K. Development of the polymer model of silicate melts. *Rasplavy*. 1987. Vol. 1, no. 6, pp. 21–23. (In Russ.).
  5. Burmasov S.P., Gudov A. G., Panfilov A. M. *Vnepechnoe rafinirovanie stali v usloviyakh gazovogo peremeshivaniya: metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu inzhenernykh raschetov vnepechnoi obrabotki stali* [Ladle refining of steel in a gas mixing: guidelines for the implementation of engineering calculations for furnace steel processing]. Ekaterinburg : UrFU, 2012. 37 p. (In Russ.).
  6. Elliott John F., Gleiser Molly, Ramakrishna V. Thermochemistry for Steelmaking. Addison-Wesley Inc. 1963. (Russ.ed.: Elliott J., Gleiser M., Ramakrishna V. *Termokhimiya staleplavil'nykh protsessov*. Moscow: Metallurgiya, 1969. 252 p.).
  7. Shakhin M.A., El'-Nikkhaili A., El'-Zeki M. Stirring the molten metal in the ladle nitrogen purge. Applying, restrictions, control. In: *Inzheksionnaya metallurgiya '86: Tr. IV mezhdunar. konf. po inzheksion. metallurgii, g. Lulea, Shchvetsiya, 11–13 iyunya 1986 g.* [Injection Metallurgy '86: Proceedings of the 4th Int. Conf. 11–13 June, 1986. Lulea, Sweden]. Kudrin V.A. ed. Moscow: Metallurgiya, 1990, pp. 146–156. (In Russ.).
- Acknowledgements.** The study was supported by RFBR grant no.13-08-12167.

Received April 7, 2015

УДК 666.187.2:621.365.2:662.612.321/322

## ОСОБЕННОСТИ АЭРОДИНАМИКИ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ СОВРЕМЕННОЙ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

**Воронов Г.В.**, д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

**Гольцев В.А.**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика

в металлургии» (v.a.goltsev@urfu.ru)

**Глухов И.В.**, студент

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

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

**Аннотация.** Представлены результаты анализа материального, элементного по кислороду и теплового балансов рабочего пространства современной дуговой сталеплавильной печи емкостью 120 т. Показано, что приход теплоты при окислении железа и других компонентов шихты настолько значителен, что тепловой режим и технологический процесс в целом приобретают признаки автогенного. Существенные потери с химическим недожогом свидетельствуют о неудовлетворительной организации аэродинамических потоков в объеме рабочего пространства печи. С использованием компьютерной программы SolidWorks Flow simulation рассмотрены аэродинамические потоки и температурные поля в зоне нахождения холодной шихты, расположенной между электродами и внутренней поверхностью стены печи. Рекомендован рациональный способ установки газокислородных горелок, фурм подачи кислорода и эжекторов для ввода углеродсодержащих материалов в ванну печи.

**Ключевые слова:** печь, дуга, сталь, металл, шихта, природный газ, кислород, горелка, фурма, факел, углерод, электрод, свод, стена.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-645-651

В мировом производстве постоянно возрастает доля стали массового потребления, выплавляемая в дуговых сталеплавильных печах (ДСП). Одним из основных факторов, связанных с динамичным ростом производства электростали, являются возрастающие запасы железосодержащего лома. Скрап от автомобилей, бытовых отходов, строительных предприятий, сельскохозяйственного и промышленного оборудования ранее перерабатывался в мартеновских печах, которые в настоящее время выведены из эксплуатации. В перспективе основная нагрузка по переработке таких шихтовых материалов придется на дуговые печи большой емкости – от 80 и более тонн [1 – 3]. В дальнейшем доля электростали будет постоянно возрастать за счет модернизации устаревших печей и переработки металлолома на современных ДСП.

Наибольшее распространение ДСП получили на мини-заводах как основной сталеплавильный агрегат для переработки железосодержащей шихты с концентрацией углерода около 0,3 %, недостаточной для завершения плавки, поэтому в исходную шихту добавляют углеродсодержащие материалы (УСМ). Способ загрузки шихты (в две бадьи на болото) и постоянно изменяющаяся плотность шихты (от 0,2 до 0,9 т/м<sup>3</sup>) накладывают дополнительные трудности в организацию теплового, аэродинамического и температурного режимов. Постоянное увеличение

численности автомобильного парка и сокращение срока эксплуатации автомобилей обеспечит железосодержащей шихтой электросталеплавильное производство [3].

Технология процесса в современных ДСП предполагает на первой стадии интенсивное расплавление шихты с последующей переработкой в сталь заданного химического состава и температуры в агрегатах внепечной обработки. Можно выделить основные мероприятия, способствующие повышению производительности печи:

- сортировка и подготовка шихтовых материалов;
- предварительный подогрев шихты за счет утилизации физической теплоты дымовых газов;
- использование в металлической шихте жидкого чугуна;
- работа печи на «болоте», т. е. использование остатка предыдущей плавки;
- применение кислородно-топливных горелок, кислородных фурм, инжекторов углерода, фурм для окисления оксида углерода в газовой среде рабочего пространства;
- наведение пенистого шлака для закрытия дуги.

Следует отметить, что с учетом условий работы электропечи нередко вносятся изменения в геометрические параметры ее рабочего пространства. При использовании легковесного лома или шихты в виде

окатышей и брикетов увеличивают объем рабочего пространства за счет высоты стены печи, преследуя тем самым возможность завалки одной бадьей. Перечисленные мероприятия не ограничивают возможность дополнительной интенсификации расплавления шихты [4, 5].

Последним достижением в совершенствовании современной ДСП с целью получения максимальной производительности по данным подразделения концерна Siemens VAI являются печи серии Ultimate [6]. Печи этой серии емкостью 120 т имеют следующие ключевые особенности:

- увеличенный объем рабочего пространства за счет изменения высоты стен;
- загрузка шихты одной бадьей;
- использование пяти универсальных фурм-горелок, трех газокислородных горелок, четырех горелок для дожигания СО в отходящих газах и инжекторов порошковых углеродосодержащих материалов.

Эффективность каждого из перечисленных технических предложений, как правило, оценивают методом сравнения технико-экономических показателей. Известно, что исследование тепло- и массообменных процессов на действующей печи исключительно сложно в экспериментальном отношении и по некоторым позициям практически невозможно. Авторами была предпринята попытка исследования тепловой работы печи первоначально с использованием материального, элементного и теплового баланса. Затем, используя компьютерное моделирование, был выполнен сравнительный анализ аэродинамических потоков и температурного состояния в холодной зоне шихтовых материалов действующей ДСП и даны рекомендации по их изменению [7].

Оценка технологических и теплотехнических показателей работы ДСП была выполнена по результатам расчетного исследования материального и теплового

баланса на действующей печи ДСП-120 фирмы Danieli для периода плавления стали 35ГС.

Приход материалов состоит из массы стального лома, чугуна, извести, кокса, природного газа, кислорода. Угар электродов и переход части футеровки в шлак были приняты по статистическим данным, полученным в цехе, а подсос воздуха из окружающей среды в печь рассчитан по элементному балансу кислорода в рабочем пространстве печи. В расходе материалов плавки учитывали массу стального полупродукта, шлака, дымовых газов и пыли. Потерей дымовых газов через зазоры между поверхностью электродов и отверстиями в своде пренебрегли. Результаты расчета материального баланса реально действующей ДСП-120 показали, что угар железа и других компонентов шихты составил 14,3 % массы садки. Это позволяет сделать вывод, что современная ДСП является комплексным агрегатом, предназначенным для переработки любой железосодержащей шихты с целью получения стального полупродукта, но имеет недопустимо высокий угар составляющих шихты. Для этой же печи рассчитали тепловой баланс (см. таблицу).

Анализ баланса показал, что физическая теплота исходных материалов оказалась незначительной. Подогрев шихты за счет утилизации теплоты дымовых газов является существенным резервом интенсификации теплообменных процессов и снижения энергозатрат. Приход теплоты при окислении железа и других компонентов шихты настолько значителен, что тепловой режим и технологический процесс в целом приобретают признаки автогенного [8]. Существенные потери с химическим недожогом свидетельствуют о неудовлетворительной организации аэродинамических потоков в объеме рабочего пространства печи при достаточном содержании кислорода в дымовых газах.

Экспериментальные исследования тепло- и массообменных процессов в рабочем пространстве ДСП

#### Тепловой баланс действующей дуговой сталеплавильной печи емкостью 120 т

##### Heat balance of the acting electric arc furnace with a capacity of 120 tons

| Статьи прихода теплоты                    | Количество теплоты, % | Статьи расхода теплоты                                                                                                        | Количество теплоты, % |
|-------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| От электрической дуги                     | 45,25                 | На нагрев, расплавление шихты, перегрев металла и образование шлака                                                           | 28                    |
| От сгорания природного газа               | 7,7                   | С дымовыми газами                                                                                                             | 28                    |
| От экзотермических реакций, в том числе:  | 46,7                  | Теплопроводностью через под печи, неводоохлаждаемые части стенки печи (шлаковый пояс), излучением через открытое рабочее окно | 1,8                   |
| – от окисления железа                     | 28,1                  |                                                                                                                               |                       |
| – от окисления углерода                   | 10,0                  |                                                                                                                               |                       |
| – от окисления алюминия                   | 8,5                   |                                                                                                                               |                       |
| – от прочих экзотермических реакций       | 0,1                   |                                                                                                                               |                       |
| Физическая теплота от исходных материалов | 0,35                  | С охлаждающей водой                                                                                                           | 15,2                  |
|                                           |                       | С химическим недожогом                                                                                                        | 27                    |
| Итого                                     | 100                   | Итого                                                                                                                         | 100                   |

имеют свою специфику и весьма затруднительны. Прямые измерения аэродинамических потоков и температурных полей на действующей печи всегда ограничены и затруднены, поэтому для их изучения применяют методы математического моделирования [9, 10]. Для расчета газодинамики и температурного состояния рабочего пространства в работе [11] использована 3D-модель печи, которая была предварительно получена в чертежно-графическом редакторе системы КОМПАС-3D, а затем импортирована в приложение SolidWorks Flow simulation.

Входные и выходные граничные условия газовой среды были приняты в соответствии с техническим регламентом ДСП-120. В частности, начальную скорость газокислородной смеси (13,52 %  $\text{CH}_4$  и 86,48 %  $\text{O}_2$ ) на срезе сопла горелки задавали равной 175,8 м/с, балансовую температуру продуктов сгорания в факеле определяли как 2700 °С, давление в рабочем пространстве печи приняли атмосферным (101 325 Па). На выходе из рабочего пространства печи (на срезе газоотводящего канала) температуру дымовых газов задали равной 1600 °С, а давление 101 275 Па (с учетом разрежения 50 Па).

К рассмотрению предложены две модели, отличающиеся размещением комбинированных топливосжигающих устройств (ТСУ) для подачи в печь энергоносителей. В первой модели ТСУ расположены радиально в соответствии с проектными рекомендациями фирмы Danieli (вариант А), во второй – исходя из рекомендаций авторов [7] и размещены тангенциально (вариант Б).

В случае размещения ТСУ по варианту Danieli (рис. 1, а), наблюдается крайне неравномерное рас-

пределение скорости продуктов горения. Отмечается активное движение продуктов сгорания у технологического окна и практически отсутствие его в объеме печи, расположенном в районе эркера. Тангенциальное размещение ТСУ по предложенному варианту (рис. 1, б) способствует организации равномерно рассредоточенного движения в рабочем пространстве газовых потоков.

На рис. 2 изображены скоростные поля газовых потоков в горизонтальных сечениях рабочего пространства печи на уровне зеркала ванны и газокислородных горелок.

В современной ДСП по варианту Danieli продукты горения распространяются радиально в направлении центра печи, достигая поверхности электродов, меняют свое направление движения и уходят в подсводовое пространство. Циркуляция продуктов горения осуществляется в вертикальной плоскости, поэтому омываемая ими поверхность шихты, участвующая в теплообмене, невелика. Сохраняя большой запас тепла, продукты сгорания покидают рабочее пространство через газоотводящий канал.

Размещение горелок с тангенциальным направлением факела вызывает горизонтальную циркуляцию продуктов горения у поверхности шихты (см. рис. 2). В данном варианте обеспечивается круговое движение газов в периферийной зоне рабочего пространства и исключается направленное воздействие потока продуктов горения на поверхность электродов. К моменту попадания в подсводовое пространство и канал дымоудаления газы совершают до четырех циркуляционных

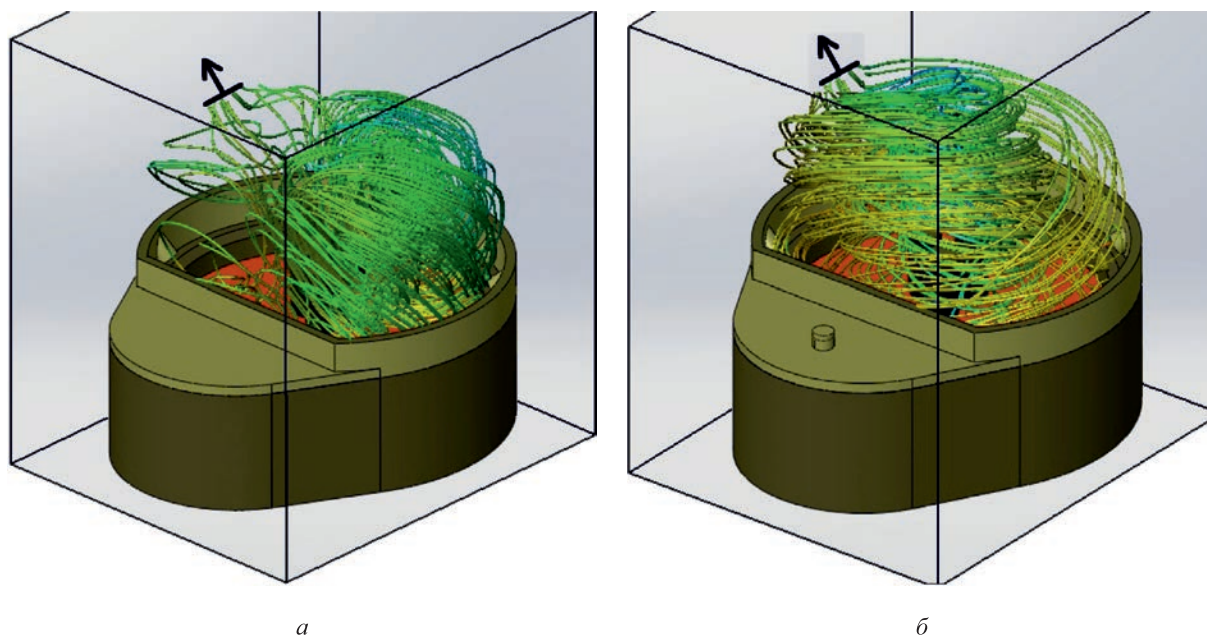


Рис. 1. Траектории движения газовых потоков в объеме рабочего пространства ДСП: а – по проекту Danieli; б – при тангенциальном расположении газокислородных горелок

Fig. 1. Trajectory of the gas flow in the volume of EAF workspace: а – Danieli project; б – with tangential gas-oxygen burners

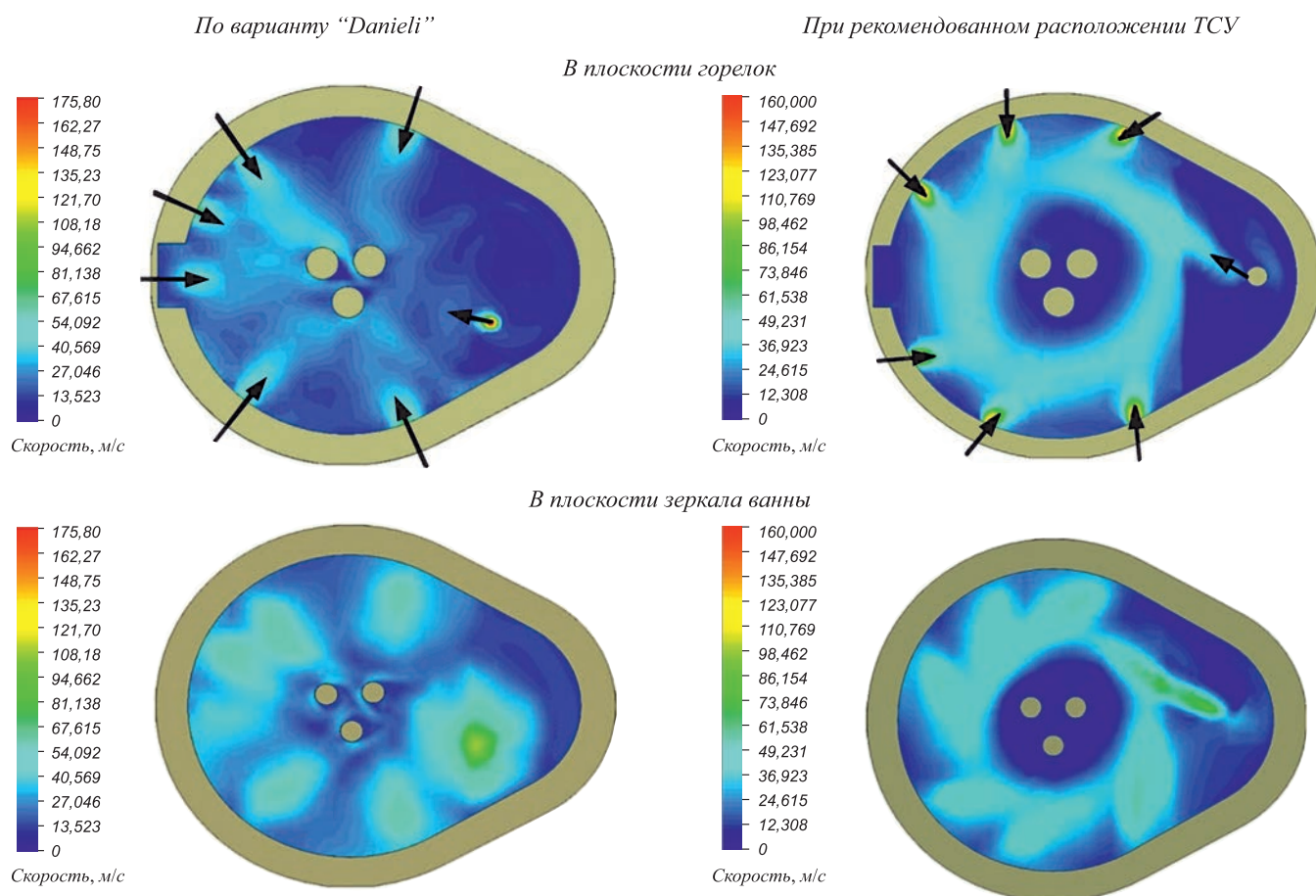


Рис. 2. Поля скоростей в горизонтальных сечениях рабочего пространства ДСП

Fig. 2. The velocity fields in the horizontal sections of EAF workspace

оборотов, имея лучшие условия для передачи тепла шихте. Интенсивное движение газов сосредоточено в нижней части объема печи у поверхности холодной шихты (плоскость зеркала ванны на рис. 2).

В сравнении с вариантом *Danieli*, предложенное расположение горелочных устройств выглядит более предпочтительным. В 2 – 3 раза увеличена кратность циркуляции газов в горизонтальной плоскости. За счет изменений в расположении горелочных устройств зона активного теплообмена расширяется более чем на 24 %.

Температурное состояние газовой среды в рабочем пространстве ДСП экспериментально изучить практически невозможно. Для решения этой задачи была использована программа *SolidWorks* при постоянных граничных условиях температуры на входе, равной расчетной балансовой температуре горения природного газа с кислородом, на выходе – 1600 °С для дымовых газов. Теплоотдача от продуктов сгорания природного газа к шихте принята постоянной и равномерно рассредоточенной по рассматриваемой зоне рабочего пространства печи. Компьютерное моделирование выполнено без учета тепловыделения в электрических дугах.

На рис. 3 представлены поля температур в поперечных сечениях, на рис. 4 – в вертикальной осевой плоскости, проходящей по двум электродам рабочего пространства ДСП.

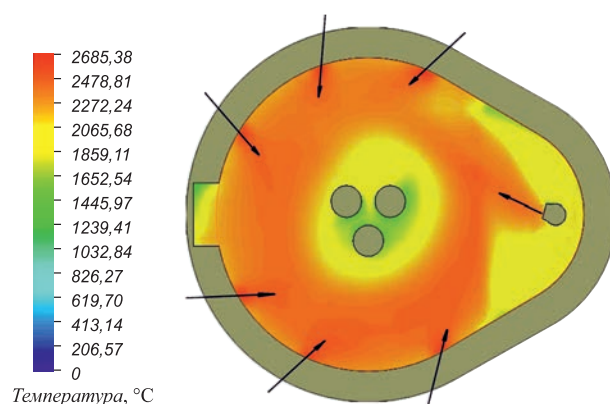
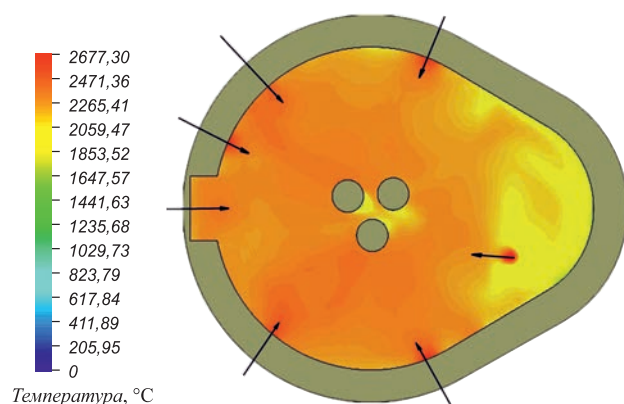
Анализируя поле температур (рис. 4, а), становится очевидным, что факелы горелок, направленных радиально, вызывают перегрев поверхности электродов. Такое же распределение температуры сохраняется и по высоте электрода. Направленное действие высокотемпературных газов на уровне плоскости горелок приводит к локальному перегреву электрода, возможной его деформации, к повышенному массообмену с избыточным кислородом, продуктами горения углеводородного топлива и углеродсодержащих материалов.

Существующая установка горелок обеспечивает высокотемпературное поле только в незначительном объеме шихты, расположенном против горелок. Равномерного распределения температуры по всему объему шихты, расположенной между электродами и поверхностью стены печи, не наблюдается. Высокие температуры отмечаются под сводом, около и выше водоохлаждаемой стеновой панели горелочного устройства. Для рассматриваемого варианта в эркерной зоне и на участ-

По варианту "Danieli"

При рекомендованном расположении ТСУ

В плоскости горелок



В плоскости зеркала ванны

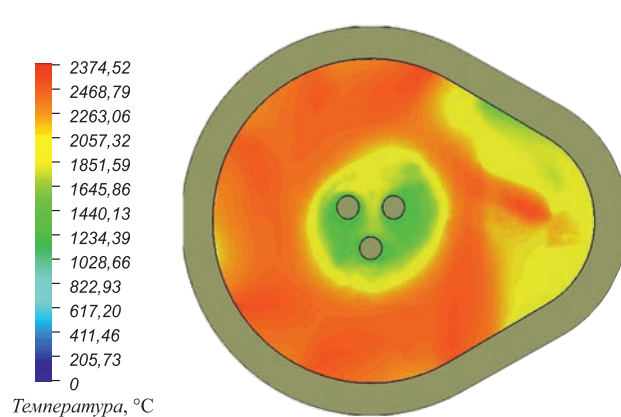
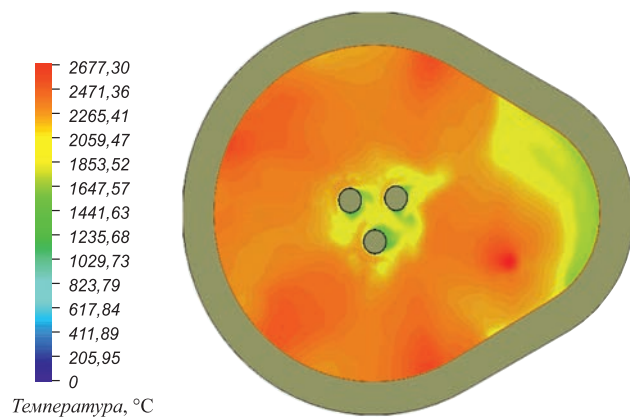
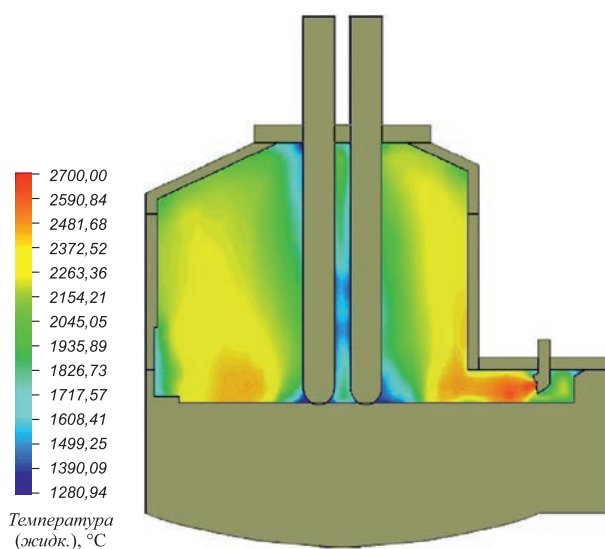
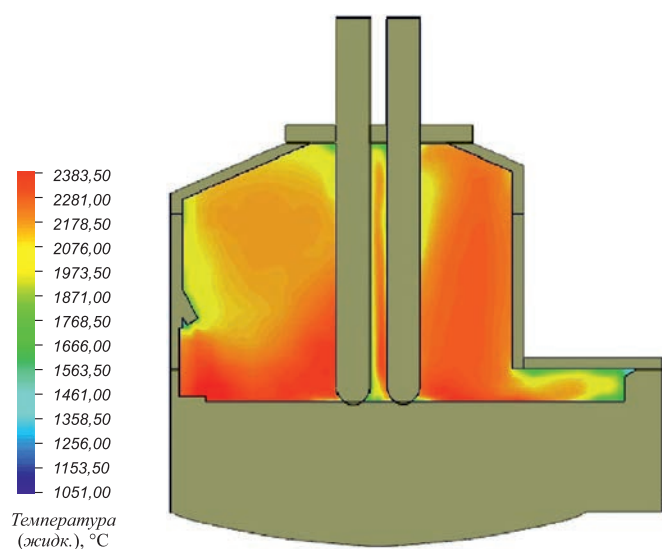


Рис. 3. Поля температур в горизонтальных сечениях рабочего пространства ДСП

Fig. 3. The temperature fields in the horizontal sections of EAF workspace



а

б

Рис. 4. Поле температуры в продольном осевом сечении по высоте печи:  
а – по проекту Danieli; б – по рекомендованному вариантуFig. 4. The temperature field in a longitudinal axial section of the furnace height:  
а – Danieli project; б – according to the recommended embodiment

ках между горелками обнаружены плохо прогреваемые поверхности, тогда как в месте установки каждой горелки наблюдается перегрев шихты. Тангенциальное расположение горелок (см. рис. 3 и 4, б) изменило траекторию движения продуктов горения и вместе с этим, подобно скорости, изменилось и распределение температурных полей. К моменту попадания в подсводовое пространство и канал дымоудаления газы с большей эффективностью передают тепло шихте [9]. Циркуляция газов способствует рассредоточенному распределению температур в зоне расположения основной массы шихты по горизонтальным сечениям и высоте рабочего пространства.

Результаты расчета материального и теплового баланса плавки на ДСП-120 (сталь 35ГС) и компьютерного моделирования аэродинамических потоков и температурного состояния в зоне расположения холодной шихты позволяют сформулировать следующие практические выводы.

- Высокий угар составляющих шихты связан с несколькими причинами. Прежде всего, стоит отметить неподготовленность шихты (окисленная и с низкой плотностью), наличие зоны сверхвысоких температур в локальных участках газокислородного факела и введение кислорода в ванну.
- При высоких значениях угара исходной шихты плавка полупродукта стали в современной ДСП приобретает признаки ярко выраженного автогенного процесса. За счет экзотермических реакций в печь поступает до 46 % теплоты от общей тепловой нагрузки. Подробный анализ температурных полей и баланса по кислороду позволит снизить угар составляющих шихты.
- Компьютерное моделирование аэродинамических потоков дымовых газов и температурного состояния в зоне расположения холодной шихты позволило сделать заключение, что в современных ДСП не решена задача по эффективному использованию химической энергии природного газа и кокса. В этих печах газовые потоки от газокислородных горелок не обеспечивают равномерный нагрев поверхности и объема холодной шихты. После завалки в шихте образуются перегретые участки, материал в которых уплотняется в процессе оседания. Вследствие направленного нагрева и усадки возможна деформация шихтовой массы с повреждением электродов и созданием нестабильного горения электрических дуг. Кроме того, радиальное расположение энергоподающих устройств, обращенных к центру печи, не создает условий для циркуляции продуктов сгорания и равномерно рассредоточенного конвективного теплообмена

с шихтой. Направление факелов на электроды становится причиной их ускоренного износа.

- Тангенциальное размещение энергоподающих устройств взамен радиального позволяет изменить аэродинамику потоков дымовых газов и улучшить прогрев шихтовых материалов. Рационально организованная подача тепловой энергии от сгорания газообразного топлива в месте расположения холодной шихты способствует быстрому прогреву материалов. Положительный результат в таком случае существенно зависит от выбранной схемы расположения энергоподающих устройств и режима их работы.

Таким образом, предложенный способ интенсивного нагрева и плавления холодной шихты позволяет за счет организации движения продуктов горения газокислородной смеси, частичного окисления углеродсодержащих материалов, без изменения номинальной электрической мощности и при незначительных конструктивных изменениях обеспечить высокую производительность ДСП по выходу полупродукта стали, снизить удельный расход электродов и осуществить долговременную эксплуатацию стеновых панелей и свода.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Worldsteel Association Steel Statistical Yearbook 2011. – Brussels: Worldsteel Committee on Economic Studies, 2011. – 120 p.
2. Белковский А.Г., Кац Я.Л., Краснянский М.В. Современное состояние и тенденции развития технологии производства стали в ДСП и их конструкции // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2013. № 3. С. 72 – 78.
3. Чижикив А.Г., Семин А.Е., Чижикина И.И. Автомобильный лом в структуре металлофонда России и технические решения по его утилизации // Электрометаллургия. 2010. № 4. С. 31 – 36.
4. Лякишев Н.П. Электрометаллургия – динамично развивающаяся отрасль сталеплавильного производства // Сталь. 2006. № 11. С. 58 – 63.
5. Проектирование и оборудование сталеплавильных цехов / В.М. Обухов, В.М. Шариков, Ю.А. Дерябин – Екатеринбург: УЦАО, 2010. – 410 с.
6. SIMETAL Ultimate. Leading EAF technology from a single source – powerful, flexible, environmentally compatible. <http://www.industry.siemens.com/datapool/industry/industrysolutions/metals/simetal/en/SIMETAL-Ultimate-en.pdf>
7. Воронов Г.В., Антропов М.В., Порох О.В. Особенности аэродинамики в рабочем пространстве современной дуговой сталеплавильной печи // Новые огнеупоры. 2014. № 7. С. 19 – 21.
8. Ванюков А.В., Зайцев В.Я. Теория пирометаллургических процессов. – М.: Металлургия, 1973. – 504 с.
9. Logar V., Dovzan D., Skrjanc I. Mathematical Modeling and Experimental Validation of an Electric Arc Furnace // ISIJ International. 2012. Vol. 52. No. 3. P. 382 – 391.
10. Logar V., Dovzan D., Skrjanc I. Modeling and Validation of an Electric Arc Furnace. Part 1. Heat and Mass Transfer // Ibid International. 2012. Vol. 52. No. 3. P. 402 – 412.
11. Воронов Г.В., Антропов М.В., Глухов И.В. Газодинамика рабочего пространства современной дуговой сталеплавильной печи // Новые огнеупоры. 2014. № 11. С. 23 – 25.

Поступила 5 апреля 2015 г.

## AERODYNAMICS AND TEMPERATURE FIELD FEATURES IN THE MODERN EAF WORKSPACE

**Voronov G.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

**Gol'tsev V.A.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

(v.a.goltsev@urfu.ru)

**Glukhov I.V.**, Student

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

**Abstract.** The paper presents the results of the design study of the material and heat balance on the existing furnace EAF-120 of company «Danieli». It is shown that the arrival of the heat in the oxidation of iron and other components of the charge is significant, and the thermal regime and the whole process become signs of autogenous process. Significant loss of chemical underburning indicate unsatisfactory organization of aerodynamic flows in the amount of working space of the furnace. Using a computer program SolidWorks Flow simulation the aerodynamic flow and the temperature field in the cold charge location disposed between the electrodes and the inner wall surface of the furnace has been considered. The authors have recommended the rational way to install oxy-fuel burners, oxygen lances and the eductors for inputting carbonaceous material into the bath of the furnace.

**Keywords:** furnace, arc, steel, metal, charge, natural gas, oxygen, burner lance, torch, carbon electrode, vault, wall.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-645-651

## REFERENCES

1. *Worldsteel Association Steel Statistical Yearbook 2011*. Brussels: Worldsteel Committee on Economic Studies, 2011. 120 p.
2. Belkovskii A.G., Kats Ya.L., Krasnyanskii M.V. Current state and development trend of production technology of steel in EAF and their design. *Byulleten' "Chernaya metallurgiya"*, 2013, no. 3, pp. 72–78. (In Russ.).
3. Chizhikov A.G., Semin A.E., Chizhikova I.I. Automobile scrap in the structure of Russian metal reserves and the technical solutions for its disposal. *Elektrometallurgiya*. 2010, no. 4, pp. 31–36. (In Russ.).
4. Lyakishev N.P. Electrometallurgy – dynamic steelmaking industry. *Stal'*. 2006, no. 11, pp. 58–63. (In Russ.).
5. Obukhov V.M., Sharikov V.M., Deryabin Yu.A., Spirin V.A., Chernavin S.B. *Proektirovanie i oborudovanie staleplavil'nykh tsekhov* [Design and equipment of steelworks]. Ekaterinburg: UTsAO, 2010. 410 p. (In Russ.).
6. *SIMETAL Ultimate. Leading EAF technology from a single source – powerful, flexible, environmentally compatible*. Available at URL: <http://www.industry.siemens.com/datapool/industry/industry-solutions/metals/simetal/en/SIMETAL-Ultimate-en.pdf>
7. Voronov, G.V., Antropov M.V., Porokh O.V. Features of aerodynamics in the workspace of modern electric arc furnace. *Novye ognepory*. 2014, no. 7, pp. 19–21. (In Russ.).
8. Vanyukov A.V., Zaitsev V.Ya. *Teoriya pirometallurgicheskikh protsessov* [Theory of pyrometallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1973. 504 p. (In Russ.).
9. Logar V., Dovzan D., Skrjanc I. Mathematical Modeling and Experimental Validation of an Electric Arc Furnace. *ISIJ International*. 2012. Vol. 52, no. 3, pp. 382–391.
10. Logar V., Dovzan D., Skrjanc I. Modeling and Validation of an Electric Arc Furnace. Part I: Heat and Mass Transfer, *Ibid International*. 2012. Vol. 52, no. 3, pp. 402–412.
11. Voronov G.V., Antropov M.V., Glukhov I.V. Gasdynamics of the workspace of modern electric arc furnace. *Novye ognepory*. 2014, no. 11, pp. 23–25. (In Russ.).

Received April 5, 2015

УДК 669.162.12

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБЖИГА МЕЛКИХ ФРАКЦИЙ СИДЕРИТА ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

**Матюхин В.И.**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика  
в металлургии» (matyhin53@mail.ru)

**Меламуд С.Г.**, к.т.н., зам. директора института материаловедения и металлургии

**Шацлло В.В.**, аспирант кафедры «Металлургия железа и сплавов»

**Матюхин О.В.**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

**Матюхина А.В.**, к.т.н., доцент кафедры «Стандартизация и сертификация»

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

**Аннотация.** Для более полного использования железных руд Бакальского рудоуправления предложен обжиг во вращающейся печи в присутствии добавок твердого топлива. Исследования особенностей кинетики тепловой обработки образцов в атмосфере воздуха при скорости нагрева 10 град/мин позволили выделить семь технологических стадий: сушка; подогрев; диссоциация карбонатов; окисление ферритов; формирование труднорастворимых силикатов; расплавление, которые сопровождаются изменением их теплового состояния и условий уплотнения. Исследования изменений линейных размеров сидеритовых образцов в процессе нагрева позволили определить условия упрочнения их структуры в выделенных стадиях тепловой обработки. Представлены результаты промышленных испытаний обжига мелкой фракции сидерита класса 10 – 0 мм во вращающейся печи, отапливаемой природным газом в присутствии добавок кокса. Показана возможность достижения выхода обожженной фракции до 62,07 % при тепловом КПД агрегата 77,27 %.

**Ключевые слова:** сидерит, кинетика кристаллохимических преобразований, кинетика уплотнения, вращающаяся печь, материальный и тепловой баланс.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-652-657

Одним из крупнейших месторождений железных руд на Южном Урале является Бакальское, общие запасы которого достигают 1 млрд т. Рудные компоненты в них представлены преимущественно сидероплезитом и пестомезитом [1]. По существующей технологии переработки железных руд на Бакальском рудоуправлении основным видом товарной продукции является концентрат обожженного сидерита для агломерации, получаемый после окислительного обжига кусковой фракции 13 – 80 мм в шахтной печи, ее магнитной сепарации и дробления до агломерационной крупности 10 – 0 мм. Если учесть, что в руднике выход кондиционной руды достигает не более 20 – 40 %, то при существующей технологии обогащения основная масса рудных компонентов остается невостребованной промышленностью и складывается в отвалах.

Исходный сидерит отличается относительно низким содержанием железа (до 28 – 38 %) и содержит в качестве пустой породы оксиды кальция и магния. После его окислительного обжига в шахтной печи выход магнитной фракции может достигать до 85 % с содержанием железа 49,8 – 53,1 %. Наличие немагнитной составляющей, которая образуется вследствие неполного обжига исходных компонентов, снижает эффективность подготовки металлургического сырья, уменьшая выход годного и увеличивая затраты на производство.

Исследования условий развития основных физико-химических процессов при обжиге сидеритов производили с использованием экспериментальных кривых дифференциальной сканирующей калориметрии мелкодисперсных проб сидерита в атмосфере воздуха при скорости нагрева 10 град/мин (рис. 1). Их анализ позволяет выделить ряд технологических стадий. В процессе тепловой обработки до температуры 77 – 87 °С рудный сидерит первоначально подвергается процессам обезвоживания с целью удаления физически связанной влаги (участок 1). В процессе дальнейшего подъема температуры (участок 2) происходит нагрев материалов, обладающих теплоемкостью 1,654 кДж/(кг·К), с увеличением их физической теплоты вплоть до 500 °С. В этот период их внутренняя структура изменяется незначительно с постепенным повышением теплосодержания образцов. В интервале температур до 600 – 640 °С (участок 3) наблюдается развитие процессов диссоциации карбонатов железа, магния и марганца с потерей массы и поглощением теплоты (67,11 кДж/кг). Образовавшиеся оксиды вступают между собой в твердофазные реакции с образованием магний-марганцевых магнетита и вюстита [2]. По достижении уровня разогрева 600 – 750 °С в атмосфере воздуха (участок 4) развиваются явления окисления образовавшихся соединений до магний-марганцевых ферритов и гематита с

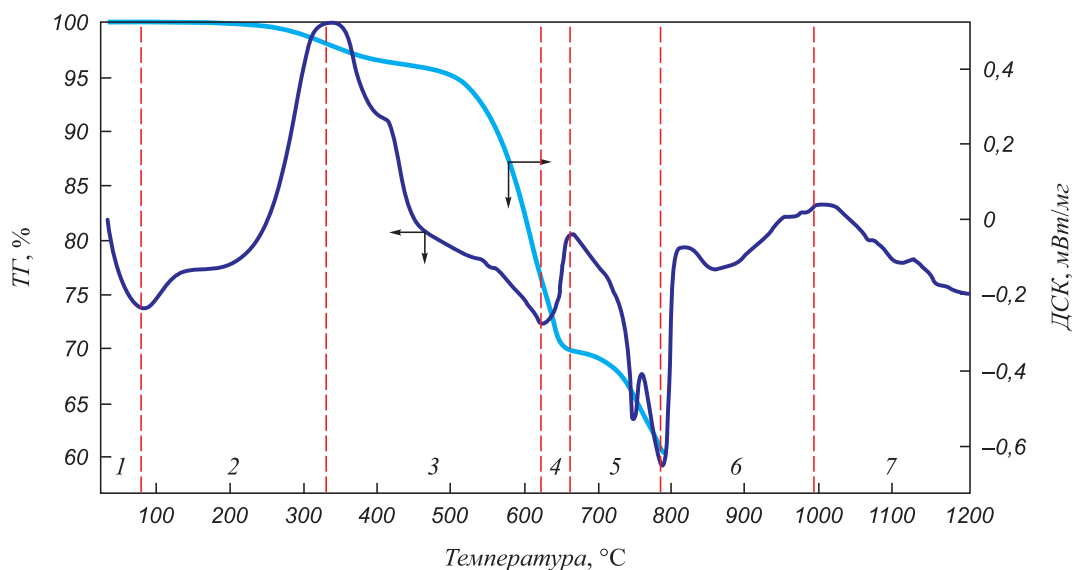


Рис. 1. Дериватограмма процесса тепловой обработки образца сидерита при скорости нагрева 10 град/мин в окислительной среде воздуха. ТГ – термогравиметрическая зависимость; ДСК – дифференциально-сканирующая кривая калориметрии

Fig. 1. Thermogram of thermal treatment process of the sample at a heating rate of siderite of 10 grad/min. in an oxidizing atmosphere of air. TG – thermogravimetric dependence; DSC – differential scanning curve of calorimetry

выделением избыточного тепла. При этом теплосодержание образцов увеличивается.

При более высоких температурах (до 760 – 800 °С) (участок 5) наблюдаются процессы твердофазного спекания исходных компонентов с формированием трудно-растворимых силикатов и понижением их теплосодержания на 168,4 кДж/кг.

Дальнейшее повышение температур нагрева образцов до 990 – 1020 °С сопровождается доокислением оксидных форм железа и марганца с образованием разновидностей ферритов при выделении избыточного тепла (участок 6).

Последующий нагрев образцов приводит к расплавлению исходных компонентов, которое протекает с поглощением тепла (участок 7). При обжиге сидеритовых руд в этот период происходит оплавление зерен магнетита и пустой породы с образованием прочных конгломератов.

Вопросы улучшения качества обжига дисперсных материалов требуют детального анализа закономерностей развития их упрочнения на основе достижений теории спекания. Рассматривая процесс тепловой обработки рудных систем независимо от вида их основы, создание прочной структуры окучкованного материала из отдельных частиц можно представить как частный случай спекания дисперсных порошков, осложненный протеканием физико-химических преобразований на границах зерен с выделением газов [3]. Последовательное повышение температуры тепловой обработки приводит к увеличению количества контактов между частицами, находящимися в соприкосновении, и при «автономной консолидации» системы [4] формирует внутреннее строение обжигаемых материалов.

На рис. 2 представлена дилатограмма изменения линейных размеров образца, изготовленного из мелко-дисперсного сидерита методом прессования при удельном давлении 100 кг/см<sup>2</sup> в процессе его непрерывного нагрева в атмосфере воздуха со скоростью 10 град/мин. Исследование этих данных позволяет выделить несколько технологических периодов их уплотнения, в течение которых в структуре образцов протекают физико-химические процессы, характеризующиеся внутренними кристаллохимическими преобразованиями и согласующиеся с результатами, показанными на рис. 1. Низкотемпературный период (до 75 – 80 °С) сушки образцов сопровождается преимущественным сокращением линейных размеров нагреваемых материалов (период 1). До температуры около 500 °С (период 2) получают преимущественное развитие

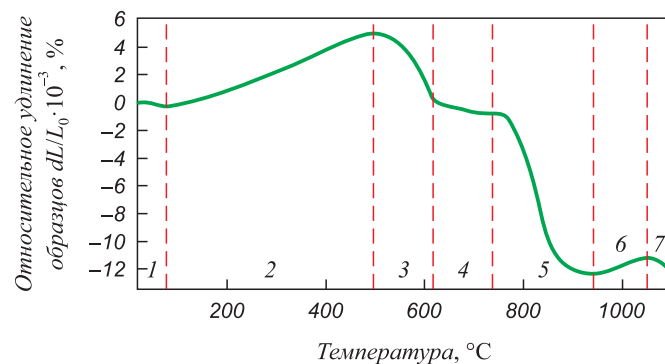


Рис. 2. Изменение линейных размеров образца сидерита в процессе непрерывного нагрева

Fig. 2. Changes in linear dimensions of the siderite sample during continuous heating

процессы теплового расширения рудной основы, характеризующиеся увеличением линейных размеров обжигаемых материалов. Термическая диссоциация карбонатов (период 3) происходит с выделением из структуры материалов диоксида углерода, который, изменяя структуру образцов, способствует увеличению объема тела. Однако развивающиеся одновременно процессы спекания, обусловленные термической активацией обжигаемых частиц, превышают результаты расширительных явлений и при нагреве образцов до температуры 620 °С наблюдаются преимущественно усадочные явления.

Нагрев материалов до температур около 740 °С (период 4) приводит к окислению закиси железа, образовавшейся на предыдущих стадиях. Согласно полученным данным, в этот период наблюдается увеличение линейных размеров испытуемых образцов, связанное с разрыхлением их структуры выделяющимися газами и изменением параметров кристаллических решеток составляющих кристаллических фаз.

В период кристаллохимических преобразований до температуры 940 °С (период 5) происходят процессы твердофазного спекания с формированием более плотной структуры и развитием усадочных явлений. При этом следует отметить последовательное протекание двух процессов: образование до 800 °С магнезиоферрита, происходящее с увеличением параметров кристаллической решетки, а при более высоких температурах образование марганцевого феррита, способствующее уплотнению конечного продукта.

При повышении уровня нагрева материалов до 1020 °С (период 6) происходит доокисление оксидных фаз ранее образовавшихся соединений железа и марганца с выделением избыточного тепла и газов. При этом формирование жидкой фазы по границам зерен обеспечивает сокращение линейных размеров обжигаемых образцов, а образование в их структуре разрыхляющих газов способствует развитию расширительных явлений. Суммарно этот период характеризуется увеличением объема нагреваемых материалов. Следует также отметить, что в этот период тепловой обработки сидеритовых образцов улучшаются их магнитные свойства с постепенным увеличением магнитной восприимчивости, что способствует в последующем улучшению отделения от пустой породы.

Образование избыточной жидкой фазы в структуре образцов существенно ускоряет усадочные явления с уменьшением их линейных размеров и оплавлением отдельных зерен (период 7). В процессе спекания порошковых материалов снижается их пористость за счет последовательного увеличения объема закрытых пор и сокращения объема открытых [4]. При этом искусственные новообразования дисперсных частиц, обладающих высокой удельной поверхностью и значительной поверхностной энергией, по мере повышения температуры способны уплотняться, уменьшая открытую

пористость при застывании отдельных пор. Скорость этого процесса определяется вязкостью образующегося на поверхности тел расплава и ограничена его подвижностью. Перемещение вещества между частицами происходит в виде адсорбированных подвижных атомов по границам зерен при их повышенной подвижности вблизи возникших структурных дефектов. Высокая температура нагрева материалов способствует увеличению подвижности атомов и возникновению между частицами перемычек из жидкого расплава, что ускоряет процесс уплотнения образцов.

Для решения проблем наиболее полного завершения процессов диссоциации карбонатов и доокисления магнетита предложено осуществить процесс обжига мелкой фракции во вращающейся трубчатой печи при совместной подаче в рабочее пространство мелкой фракции сидеритовой руды класса 10 – 0 мм и кокса класса орешек (менее 20 мм). Простота конструкции этого теплового агрегата и возможность переработки материалов с различным гранулометрическим составом [5] являются привлекательными с точки зрения реализации пирометаллургической стадии производства, а возможность при этом увеличения длительности тепловой обработки обеспечивает завершенность основных физико-химических процессов. Однако низкая интенсивность теплообмена между газами и нагреваемыми материалами при ограниченности поверхности теплообмена, пониженная скорость движения газов в рабочем пространстве вращающейся печи, зональность условий тепловой обработки материалов, высокие эксплуатационные затраты по обслуживанию агрегата, значительные объемы экологических выбросов сдерживают применение обжига сидеритовых руд. В основе оценки возможностей использования этого теплового агрегата лежат данные о состоянии и соотношении статей материального и теплового балансов, полученных на основании экспериментальных измерений.

Промышленные исследования возможностей обжига мелкой фракции сидеритов класса 10 – 0 мм производили на ОАО «Комбинат «Магнезит» во вращающейся печи № 3 длиной 75 м с внутренним диаметром барабана 3,0 м, отапливаемой при факельном сжигании природного газа в присутствии добавок кускового кокса класса +20 мм. Обожженный продукт охлаждался в отдельном барабанном холодильнике. Запыленные газы очищались в системе газоочистки, состоящей из осадительной камеры, циклонов и электрофилтра. Основные характеристики ее работы за период испытаний показаны в табл. 1.

Химический состав исходных рудных компонентов шихты и продуктов обжига представлен в табл. 2.

Для определения основных массовых потоков на обжиговой печи был составлен ее материальный баланс (табл. 3). Анализ полученных данных позволяет установить, что в приходной части материального баланса

Таблица 1

**Технологические параметры обжига мелкой фракции сидеритов во вращающейся печи****Table 1. Technological parameters of firing of siderite small fraction in a rotary furnace**

| Наименование                                                    | Величина    |
|-----------------------------------------------------------------|-------------|
| Расход шихты, кг/ч,<br>в том числе:                             | 17 500      |
| – сидерит                                                       | 14 000      |
| – кокс                                                          | 3500        |
| Влажность шихты, %                                              | 20,41       |
| Расход природного газа, м <sup>3</sup> /ч                       | 1000        |
| Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч,<br>в том числе:              | 13 000      |
| – организованного                                               | 10 000      |
| – подсасываемого                                                | 3000        |
| Температура шихты на входе в печь, °С                           | 24          |
| Температуры материалов на выходе из<br>печи, °С                 | 1150 – 1204 |
| Температура подсасываемого воздуха из<br>атмосферы, °С          | 24          |
| Температура отходящих газов в обресе<br>печи, °С                | 910         |
| Химический состав газов в обресе печи, %:                       |             |
| – CO <sub>2</sub>                                               | 17,8        |
| – O <sub>2</sub>                                                | 1,2         |
| – CO                                                            | 0,1         |
| – N <sub>2</sub>                                                | 80,9        |
| Запыленность отходящих газов в обресе печи,<br>г/м <sup>3</sup> | 185         |
| Разрежение в горячей головке, Па                                | 0,5         |
| Выход фракции: магнитная/немагнитная,<br>%/%                    | 85/15       |

обжиговой печи доля твердых компонентов составляет 17 500 кг/ч или 52,44 %. Выход обожженного продукта из сидерита составляет только  $8689,66 / 14\,000 = 62,07$  %.

Таблица 2

**Усредненный химический состав исходных рудных компонентов и продуктов обжига****Table 2. The average chemical composition of the original ore components and products of firing**

| Вид материала                 | Химический состав, % |       |                    |        |
|-------------------------------|----------------------|-------|--------------------|--------|
|                               | Fe <sub>общ.</sub>   | FeO   | Fe <sub>мет.</sub> | п.п.п. |
| Сидерит                       | 20,55                | 28,98 | 0,0                | 46,04  |
| Обоженная магнитная фракция   | 50,73                | 20,28 | 33,42              | 14,9   |
| Обоженная немагнитная фракция | 4,08                 | 6,35  | 2,85               | 66,23  |

Обращает на себя внимание существенная доля пылевых выбросов из печи (11,38 %), которые улавливаются в системе газоочистки.

По данным материального баланса был составлен тепловой баланс печи в соответствии с методикой, приведенной в работе [6] (табл. 4).

Анализ статей теплового баланса показал, что тепловой КПД агрегата при обжиге мелкой фракции сидеритов в присутствии добавок кокса составляет  $8,55 + 68,72 = 77,27$  % благодаря использованию внутреннего источника теплоты в виде горящего твердого топлива. Поскольку в процессе исследований разделить тепловые эффекты экзо- и эндотермических реакций в слое не представлялось возможным, то при составлении теплового баланса определялся их суммарный результат.

Основной расход тепловой энергии на печи связан с физической теплотой готового продукта (8,55 %), который частично утилизируется в барабанном холодильнике в виде физической теплоты подогретого воздуха в количестве 1201,59 кВт (3,41 %) с его возвратом в рабочее пространство, а также с физической теплотой отходящих газов, утилизация которых может осуществляться с применением теплоэнергетического оборудования.

Таблица 3

**Материальный баланс обжига сидеритов во вращающейся печи****Table 3. Material balance of siderite firing in a rotary furnace**

| Приход массы        |            |        | Расход массы        |            |        |
|---------------------|------------|--------|---------------------|------------|--------|
| наименование статьи | количество |        | наименование статьи | количество |        |
|                     | кг/ч       | %      |                     | кг/ч       | %      |
| Сидерит             | 14 000     | 41,95  | Обоженный продукт   | 8689,66    | 26,04  |
| Кокс                | 3500       | 10,49  | Отходящие газы      | 20 887,42  | 62,61  |
| Природный газ       | 215        | 0,64   | Выбросы пыли        | 3796,80    | 11,38  |
| Расход воздуха      | 15 658,88  | 46,92  |                     |            |        |
| Итого: приход массы | 33 373,88  | 100,00 | Итого: расход массы | 33 373,88  | 100,00 |

Таблица 4

Тепловой баланс вращающейся печи для обжига сидеритов

Table 4. The heat balance of a rotating furnace for siderite firing

| Приход теплоты                         |            |       | Расход теплоты                          |            |        |
|----------------------------------------|------------|-------|-----------------------------------------|------------|--------|
| наименование статьи                    | количество |       | наименование статьи                     | количество |        |
|                                        | кВт        | %     |                                         | кВт        | %      |
| Химическая теплота, в том числе:       | 34 073,75  | 96,59 | Физическая теплота обожженного продукта | 3017,18    | 8,55   |
| – кокса                                | 24 115,97  | 68,36 |                                         |            |        |
| – природного газа                      | 9957,78    | 28,23 |                                         |            |        |
| Физическая теплота подогретого воздуха | 1201,59    | 3,41  | Физическая теплота отходящих газов      | 5471,24    | 15,51  |
|                                        |            |       | Физическая теплота пыли                 | 969,34     | 2,75   |
|                                        |            |       | Потери теплоты с химическим недожогом   | 72,4       | 0,21   |
|                                        |            |       | Теплота эндотермических реакций         | 24 241,37  | 68,72  |
|                                        |            |       | Потери теплоты в окружающую среду       | 1503,81    | 4,26   |
| Итого: приход теплоты                  | 35 275,34  | 100,0 | Итого: расход теплоты                   | 35 275,34  | 100,00 |

Обращает на себя внимание повышенная доля потерь теплоты с пылью. Ее утилизация может быть обеспечена использованием отдельных теплообменников, устанавливаемых в осадительной пылевой камере.

**Выводы.** Проведенные испытания по обжигу мелкой фракции сидеритов во вращающейся печи показали возможность достаточно полного завершения основных физико-химических преобразований в их структуре преимущественно в режиме твердофазного спекания с получением частично металлизированного продукта.

Использование комбинированного топлива в виде добавок кокса в шихту и природного газа при его факельном сжигании обеспечивают высокий тепловой КПД агрегата (77,27 %) с минимальными тепловыми потерями с отходящими газами (15,51 %), с химическим недожогом (0,21 %) и в окружающую среду через стенки печи (4,26 %).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимесков В.А. Минералогия карбонатных руд и вмещающих их карбонатных пород Бакальского железорудного месторождения на Южном Урале. – Казань: Казанский университет, 1963. – 214 с.
2. Определение теплофизических свойств материалов металлургического производства / Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев, В.И. Матюхин и др. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 180 с.
3. Гегузин Я.Е. Физика спекания. – М.: Наука, 1984. – 312 с.
4. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. Металлургия железа. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 464 с.
5. Теплотехнические расчеты печей глиноземного производства / С.Н. Гушин, В.А. Гольцев, В.И. Матюхин и др. – Екатеринбург: УГТУ, 2000. – 230 с.
6. Металлургические печи. Теория и расчеты: В 2-х томах. Т. 2. / В.И. Губинский, В.И. Тимошпольский, В.М. Ольшанский и др. / Под ред. В.И. Тимошпольского, В.И. Губинского. – Минск: Белорус. наука, 2007. – 832 с.

Поступила 9 июля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 9, pp. 652–657.

THE INVESTIGATION OF FIRING OF SIDERITE SMALL FRACTIONS IN A ROTARY FURNACE

**Matyukhin V.I.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (matyukhin53@mail.ru)

**Melamud S.G.**, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director of the Institute of Materials Science and Metallurgy

**Shatsillo V.V.**, Postgraduate of the Chair “Metallurgy of iron and alloys”

**Matyukhin O.V.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

**Matyukhina A.V.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Standardization and Certification”

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

**Abstract.** The Bakal Mining Administration was asked to burn iron ores in a rotary furnace in the presence of solid fuel additives for more in-depth use of them. The kinetics studies of their characteristics of heat treatment in air at a heating rate of 10 grad./min made possible to identify seven process steps: drying, preheating dissociation of the carbonates, iron oxidation, formation of sparingly soluble silicate melt, accompanied by a change in their state, and the heat sealing conditions. The studies of changes of linear dimensions siderite samples during the isospeed heating made possible to establish the strengthening conditions for their structures in selected stages of heat treatment. The

results of industrial test of firing of siderite of class (10 – 0) mm in a rotary furnace, heated with natural gas in the presence of additives coke are presented. The possibility of achieving the output burnt fraction to 62.07 % is described for the thermal efficiency of the unit – 77,27 %.

**Keywords:** siderite, kinetics of crystal-chemical transformations, densification kinetics, rotary furnace, material and heat balances.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-652-657

## REFERENCES

1. Timeskov V.A. *Mineralogiya karbonatnykh rud i vmeshchayushchikh ikh karbonatnykh porod Bakal'skogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya na Yuzhnom Urale* [Mineralogy of carbonate ores and their host carbonate rocks of Bakal iron ore deposit in the Southern Urals]. Kazan: Kazanskii universitet, 1963, 214 p. (In Russ.).
2. Yur'ev B.P., Gol'tsev V.A., Matyukhin V.I., Matyukhin O.V., Sheshukov O.Yu. *Opredelenie teplofizicheskikh svoistv materialov metallurgicheskogo proizvodstva* [Determination of thermal properties of materials of metallurgical production]. Ekaterinburg: OOO "UIPTs", 2014, 180 p. (In Russ.).
3. Geguzin Ya.E. *Fizika spekaniya* [Physics of sintering]. Moscow: Nauka, 1984, 312 p. (In Russ.).
4. Yusfin Yu.S., Pashkov N.F. *Metallurgiya zheleza* [Metallurgy of iron]. Moscow: IKTs "Akademkniga", 2007, 464 p. (In Russ.).
5. Gushchin S.N., Gol'tsev V.A., Matyukhin V.I., etc. *Teploekhnicheskie raschety pechei glinozemnogo proizvodstva* [Thermal calculations of furnaces for alumina production]. Ekaterinburg: UGTU, 2000, 230 p. (In Russ.).
6. *Metallurgicheskie pechi. Teoriya i raschety. T. 2* [Metallurgical furnace. Theory and calculation: Vol. 2]. Timoshpol'skii V.I., Gubinskii V.I., Olshanskii V.M. eds. Minsk: Belorus. Nauka, 2007, 832 p. (In Russ.).

Received July 9, 2015

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АНАЛИЗА ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА

**Филатов С.В.<sup>1</sup>**, управляющий директор

**Загайнов С.А.<sup>2</sup>**, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Металлургия железа и сплавов» (zagainovsky@mail.ru)

**Гилева Л.Ю.<sup>2</sup>**, к.т.н., доцент кафедры «Металлургия железа и сплавов»

**Пыхтеева К.Б.<sup>2</sup>**, к.т.н., доцент кафедры «Металлургические технологии»

<sup>1</sup> ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат»

(398040, Россия, Липецк, пл. Металлургов, 2)

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

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

**Аннотация.** Рассмотрены термодинамика и кинетика восстановления оксидов железа и разработана методика оценки изменения степени использования монооксида углерода в зависимости от интенсивности доменной плавки. Адекватность модели подтверждается сопоставлением результатов моделирования и производственных данных о работе доменных печей объемом 2200 и 3200 м<sup>3</sup>. Показано, что при высокой степени развития процессов косвенного восстановления изменение интенсивности плавки будет сопровождаться существенными колебаниями теплового состояния.

**Ключевые слова:** интенсивность доменной плавки, степень косвенного восстановления, термодинамика и кинетика восстановления оксидов железа, время пребывания материалов в печи.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-658-661

Влияние интенсивности доменной плавки на процесс косвенного восстановления оксидов железа общепризнано. В частности, в работе [1] дается качественный анализ влияния условий плавки на степень развития реакции косвенного восстановления.

Целью данного исследования является разработка математической модели для оценки влияния интенсивности плавки на степень использования восстановительного потенциала монооксида углерода, которая во многом определяет развитие реакций прямого восстановления.

Известно, что большинство восстановительных реакций в доменной печи не достигает равновесия. Влияние времени восстановления на отклонение концентрации продуктов реакции от равновесной выражается через скорость реакции [2]

$$v = \frac{dx}{d\tau} = k(x - x_p) = e^{k\tau}, \quad (1)$$

где  $v$  – скорость химической реакции, моль/л·с;  $x$  – концентрация вещества, моль/л;  $x_p$  – равновесная концентрация, моль/л;  $\tau$  – время, с;  $k$  – константа скорости реакции, с<sup>-1</sup>.

Интегрирование данного выражения позволяет получить зависимость отклонения концентрации вещества относительно равновесной от времени протекания реакции

$$\int_{x_p}^x \frac{dx}{x - x_p} = k \int_0^{\tau} d\tau \quad (2)$$

или

$$x - x_p = e^{k\tau}. \quad (3)$$

При переходе к контролируемому технологическому показателю, характеризующему развитие реакции косвенного восстановления – степени использования монооксида углерода, уравнение (3) примет вид:

$$\eta_{CO} = \eta_{CO}^p (1 - e^{-k\tau}), \quad (4)$$

где  $\eta_{CO}^p$  – равновесная степень использования монооксида углерода, доли единиц,  $\tau$  – время пребывания материала в зоне восстановления, с.

Расчет степени использования монооксида углерода производится с использованием метода натурно-математического моделирования [3]. После линеаризации уравнения (4) получим:

$$\frac{\Delta\eta_{CO}}{\eta_{CO}} = \frac{\Delta\eta_{CO}^p}{\eta_{CO}^p} - \frac{e^{k\tau}}{1 - e^{k\tau}} (k\Delta\tau + \Delta k\tau). \quad (5)$$

Для расчета входящей в уравнение (5) константы скорости реакции привлекаются практические данные о работе печи

$$k = \frac{\ln(\eta_{\text{CO}} - \eta_{\text{CO}}^p)}{\tau}. \quad (6)$$

При допущении постоянства константы скорости реакции в области рабочих режимов, уравнение (6) принимает вид

$$\Delta\eta_{\text{CO}} = \frac{\eta_{\text{CO}}}{\eta_{\text{CO}}^p} \Delta\eta_{\text{CO}}^p - \eta_{\text{CO}} \frac{ke^{k\tau}}{1 - e^{k\tau}} \Delta\tau. \quad (7)$$

Первое слагаемое позволяет учесть влияние на степень развития реакции косвенного восстановления термодинамических факторов, второе слагаемое – кинетических факторов. Влияние как термодинамического, так и кинетического фактора в большей степени проявляется при высокой фактической степени использования монооксида углерода, т. е. при использовании в шихте агломерата высокого качества и оптимального распределения рудной нагрузки по радиусу печи.

Данное уравнение позволяет оценить влияние технологических факторов – давления и интенсивности плавки при конкретных условиях работы печи на ход восстановительных процессов.

Анализ термодинамического равновесия реакций  $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$  и  $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$ , выполненный по известным зависимостям констант равновесия реакций от давления и температуры [4, 5], позволяет оценить влияние технологических факторов на равновесную степень использования монооксида углерода (рис. 1).

При построении диаграммы рассматривались константы равновесия реакций газификации углерода, находящегося в аморфном состоянии и в виде графита.

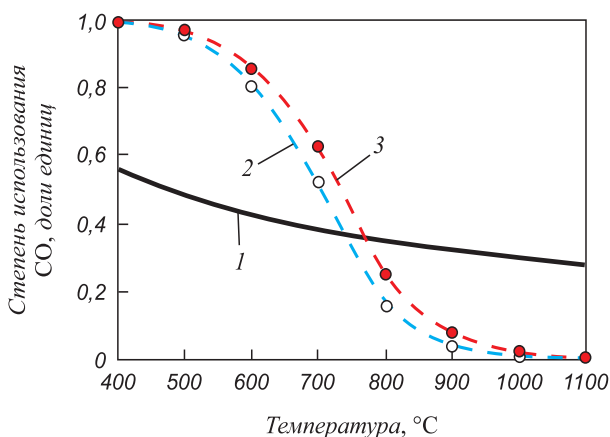


Рис. 1. Зависимость равновесной степени использования углерода от температуры и давления:

1 – реакция  $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$ ; 2 – реакция  $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$  при  $P = 0,2$  МПа; 3 – реакция  $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$  при  $P = 0,4$  МПа

Fig. 1. Dependence of equilibrium degree of the use of carbon from temperature and pressure:

1 – reaction  $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$ ; 2 – reaction  $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$  at  $P = 0,2$  МПа; 3 – reaction  $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$  at  $P = 0,4$  МПа

та. При температурах 800 – 1100 °С относительное отклонение численных значений констант равновесия не превышает 2 % (отн.).

Учитывая, что бесконусный загрузочный аппарат позволяет работать с избыточным давлением газа под колошником до 0,25 МПа, при этом давление в зоне начала интенсивного развития реакции прямого восстановления монооксида железа достигает 0,4 МПа, рассматривали равновесие реакций восстановления в диапазоне 0,2 – 0,4 МПа.

Обработка приведенной на рис. 1 зависимости показала, что в интервале температур 800 – 900 °С повышение давления на 0,01 МПа приводит к увеличению равновесной степени использования монооксида углерода на 0,002 доли единиц.

Повышение давления, кроме того, приводит к смещению границы начала развития реакций прямого восстановления в область более высоких температур, что в свою очередь приводит к увеличению зоны косвенного восстановления и увеличению времени пребывания материала в этой зоне:

$$\tau_{\text{KB}} = \frac{h_{\text{KB}}}{v_{\text{KB}}}, \quad (8)$$

где  $\tau_{\text{KB}}$  – время пребывания материала в зоне косвенного восстановления, с;  $h_{\text{KB}}$  – высота зоны косвенного восстановления, м;  $v_{\text{KB}}$  – скорость движения материалов в зоне косвенного восстановления, м/с.

Принимая допущение о пропорциональности изменения скорости движения материалов в зоне косвенного восстановления общей скорости движения материалов и, следовательно, времени пребывания материалов в печи, после линеаризации уравнения (8) получим:

$$\frac{\Delta\tau_{\text{KB}}}{\tau_{\text{KB}}} = \frac{\Delta h_{\text{KB}}}{h_{\text{KB}}} + \frac{\Delta\tau}{\tau}, \quad (9)$$

где  $\tau$  – время пребывания материала в печи, с.

Изменение высоты зоны косвенного восстановления рассчитывается по известной методике [3, 6]. Оценочные расчеты относительного изменения высоты зоны косвенного восстановления при увеличении давления 0,01 МПа на 0,0025 показали, что определяющим фактором является изменение времени пребывания материалов в печи, зависящее от ее суточной производительности:

$$\tau = \frac{V_0}{P\gamma_{\text{ш}}}, \quad (10)$$

где  $V_0$  – объем зоны косвенного восстановления, м<sup>3</sup>;  $P$  – суточная производительность печи, т/с;  $\gamma_{\text{ш}}$  – удельный объем шихты, м<sup>3</sup>/т чугуна.

Снижение производительности доменной печи приводит к увеличению времени пребывания шихты в печи и, следовательно, к увеличению времени пребывания

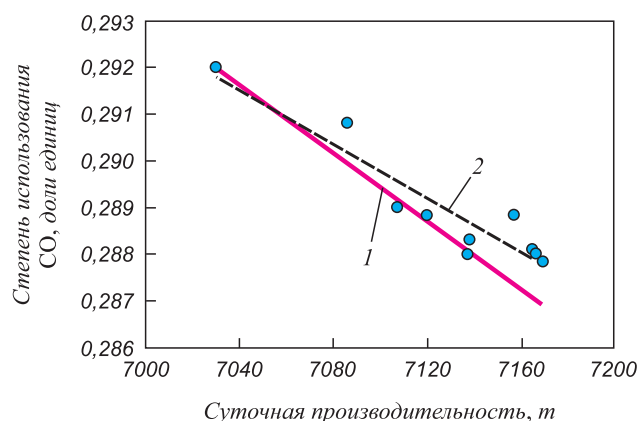


Рис. 2. Сопоставление расчетных и фактических зависимостей между интенсивностью плавки и степенью использования монооксида углерода для доменной печи объемом 2200 м³:

1 – результаты расчета; ● – фактические данные; 2 – линейная регрессия (фактические данные)

Fig. 2. Comparison of calculated and industrial data dependences with production intensity and the degree of the use of carbon monoxide for blast furnace of volume 2200 m³:

1 – calculated results; ● – industrial data; 2 – linear regression (Industrial data)

железорудных материалов в зоне косвенного восстановления. Поэтому возможно увеличение степени косвенного восстановления, и, следовательно, снижение степени прямого восстановления за счет кинетики восстановления.

Приведенная выше методика может быть использована для прогнозной оценки эффективности технологических мероприятий, направленных на изменение интенсивности доменной плавки.

Приведенные на рис. 2 и 3 результаты сопоставления расчетных и фактических зависимостей между интенсивностью плавки и степенью использования монооксида углерода для доменных печей объемом 2200 и 3200 м³ подтверждают адекватность методики.

Суммарный эффект изменения степени использования монооксида углерода, который определяется влиянием времени пребывания шихты в зоне косвенного восстановления и изменением равновесия реакции  $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$  при снижении производительности на 10 % составляет 0,020 – 0,025. Такое изменение степени использования монооксида углерода приведет к увеличению удельного расхода кокса на 9 – 12 кг/т чугуна.

Результаты теоретических исследований и анализ производственных данных показали существенное влияние давления на развитие реакций косвенного восстановления монооксида железа, а, следовательно, и на удельный расход кокса. При высокой степени развития процессов косвенного восстановления изменение ин-

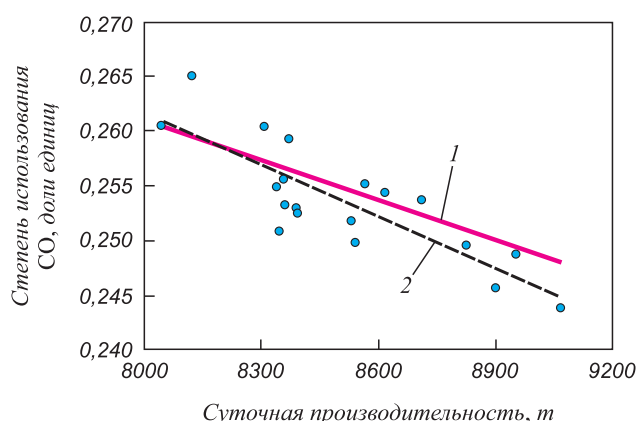


Рис. 3. Сопоставление расчетных и фактических зависимостей между интенсивностью плавки и степенью использования монооксида углерода для доменной печи объемом 3200 м³:

1 – результаты расчета; ● – фактические данные; 2 – линейная регрессия (фактические данные)

Fig. 3. Comparison of calculated and industrial data dependence from production intensity and the degree of carbon monoxide use of for blast furnace of volume 3200 m³:

1 – calculated results; ● – industrial data; 2 – linear regression (Industrial data)

тенсивности плавки будет сопровождаться существенными колебаниями теплового состояния.

**Выводы.** Разработан подход к анализу восстановления оксидов железа при изменении интенсивности плавки. Анализ результатов моделирования и фактических данных о работе доменных печей показал значимость данного фактора и необходимость его учета при выборе технологического режима при заданном изменении производства.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Товаровский И.Г. Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы. – Днепропетровск: Пороги, 2003. – 596 с.
2. Тепло- и массообмен в плотном слое / Б.И. Китаев, В.Н. Тимофеев, Б.А. Боковиков и др. – М.: Металлургия, 1972. – 432 с.
3. Информационные системы в металлургии / Н.А. Спирин, Ю.В. Ипатов, В.И. Лобанов и др. – Екатеринбург: УГТУ, 2001. – 617 с.
4. Доменное производство: Справочное издание / Под ред. Е.Ф. Вегмана. Т. 1. – М.: Металлургия, 1989. – 486 с.
5. Shen W., Wu S.L., Zhang L.H. Real-time estimate of blast furnace theoretical combustion temperature based on the variation of gas utilization rate and coke ratio // 6th Int. Congress of the Science and technology of Ironmaking. 2012. С. 366 – 372.
6. Шаврин С.В., Ченцов А.В. К расчету высоты ступеней теплообмена в доменных печах // Изв. вуз. Черная металлургия. 1960. № 11. С. 27 – 31.

Поступила 4 апреля 2015 г.

## DEVELOPMENT OF THE ANALYSIS OF IRON OXIDE REDUCTION PROCESSES

**Filatov S.V.**<sup>1</sup>, Managing Director

**Zagainov S.A.**<sup>2</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair  
“Metallurgy of Iron and Alloys” (zagainovsky@mail.ru)

**Gileva L.Yu.**<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Eng.) Assist. Professor, Head of  
the Chair “Metallurgy of Iron and Alloys”

**Pykhteeva K.B.**<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the  
Chair “Metallurgical Technology”

<sup>1</sup> JSC “Novolipetsk Metallurgical Plant” (2, Metallurgov sqr., Lipetsk, 398040, 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 article presents the study of connection between thermodynamics and kinetics of iron oxide reduction and production intensity. Model equations were developed for assessing the changes in degree of carbon monoxide use at the change in production intensity. Industrial data of blast furnace production with the useful volume of 2000 and 3200 confirmed the adequacy of the developed model. It was found that, the change in production intensity is accompanied by unsteady thermal state at high degree of developmental reproduction processes.

**Keywords:** production intensity, degree of indirect reduction, thermodynamics and kinetics of iron oxide reduction, production time.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-658-661

## REFERENCES

1. Tovarovskii I.G. *Domennaya plavka. Evolyutsiya, khod protsessov, problemy i perspektivy* [Blast furnace. Evolution, course of the processes, problems and prospects]. Dnepropetrovsk: Porogi, 2003. 596 p. (In Russ.).
2. Kitaev B.I., Timofeev V.N., Bokovikov B.A. etc. *Teplo- i massoobmen v plotnom sloe* [Heat and mass transfer in a dense layer]. Moskva: Metallurgiya, 1972. 432 p. (In Russ.).
3. Spirin N.A., Ipatov Yu.V., Lobanov V.I., Krasnobaev V.A., Lavarov V.V., Rybolovlev V.Yu., Shvydkii V.S., Zagainov S.A., Onorin O.P. *Informatsionnye sistemy v metallurgii* [Information systems in industry]. Ekaterinburg: Ural'skii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2001. 617 p. (In Russ.).
4. *Domennoe proizvodstvo: Spravochnoe izdanie* [Blast Furnaces: Reference book]. Vegman E.F. ed. Vol. 1. Moscow: Metallurgiya, 1989. 486 p. (In Russ.).
5. Shen W., Wu S.L., Zhang L.H., Wu J., Xu J., and Kou M.Y. Real-time estimate of blast furnace theoretical combustion temperature based on the variation of gas utilization rate and coke ratio. *6th Int. Congress of the Science and technology of Ironmaking*. 2012, pp. 366–372.
6. Shavrin S.V., Chentsov A.V. To the calculations of height of heat transfer steps in blast furnaces. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1960, no. 11, pp. 27–31. (In Russ.).

Received April 4, 2015

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ВАЛА ПЕЧНОГО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВЕНТИЛЯТОРА

*Зайнуллин Л.А.<sup>1</sup>, д.т.н., профессор, генеральный директор (aup@vniimt.ru)*

*Калганов М.В.<sup>1</sup>, научный сотрудник (z1917@mail.ru)*

*Калганов Д.В.<sup>1</sup>, научный сотрудник*

*Ярчук В.Ф.<sup>2</sup>, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»*

<sup>1</sup> ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники»

(620137, Россия, Екатеринбург, ул. Студенческая, 16)

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

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

**Аннотация.** Получена экспериментальная зависимость конвективной теплоотдачи от открытой поверхности вала печного высокотемпературного вентилятора в окружающую среду при различной частоте его вращения. Показано, что в сопоставимых условиях средний коэффициент теплоотдачи от поверхности вращающегося вала на 40 – 60 % больше, чем при обдуве потоком воздуха в поперечном направлении одиночного неподвижного цилиндра. Предложена методика расчета охлаждения вращающегося вала и получена математическая формула, пригодная для оценки его температуры в районе подшипников в зависимости от конструктивных параметров вентилятора и режимов работы печи. Расчетами показано, что при увеличении числа оборотов вращения вала температура нагрева подшипников интенсивно снижается в диапазоне от 100 до 600 об/мин. В случае дальнейшего повышения частоты вращения вала температура подшипников практически стабилизируется. Из анализа предложенной расчетной зависимости следует, что для снижения нагрева подшипников при выбранной частоте вращения и диаметре вала необходимо увеличивать длину открытой поверхности вала или применять материалы с возможно меньшим коэффициентом теплопроводности. Представленные зависимости могут быть использованы при разработке высокотемпературных вентиляторов для нагревательных и термических печей.

**Ключевые слова:** печной высокотемпературный вентилятор, конвективный теплообмен, охлаждение вала и подшипников вентилятора.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-662-666

В настоящее время имеется потребность все большего применения разных типов и способов принудительной циркуляции в нагревательных и термических печах с широким разнообразием как по технологическому назначению, так и по их конструктивному оформлению [1 – 9]. Использование движения газовой среды в печном объеме позволяет существенно интенсифицировать процессы конвективного нагрева или охлаждения обрабатываемых материалов при обеспечении высокого качества получаемых изделий.

Для движения газа по циркуляционному контуру печи используют вентиляторы центробежного или осевого типа, приспособленные для работы при высоких температурах. Такие вентиляторы, как правило, проектируются и изготавливаются по схожим конструктивным схемам, при этом рабочее колесо (ротор), закрепленное на валу, помещается в рабочее пространство печи, а электропривод располагается с ее внешней стороны. Высокотемпературная часть вентилятора отделена от низкотемпературной теплоизолирующей стенкой (пробкой) (рис. 1). Тепло от нагретого рабочего колеса через ступицу передается на соответствующий конец вала, по которому за счет теплопроводности оно рас-

пространяется по его длине в сторону низкотемпературной части.

Значительная часть этого тепла рассеивается в окружающее пространство с открытой поверхности вращающегося вала на участке между внешней стенкой и подшипниками. Знание закономерностей теплообмена этого узла вентилятора с окружающей средой позволяет определить необходимую длину вала, при которой исключается перегрев подшипников. Эксплуатация подшипников при температуре выше допустимых значений, как правило, сопровождается выгоранием и коксованием смазки с последующим их заклиниванием и выходом из строя всего вентилятора.

На экспериментальном стенде Научно-исследовательского института металлургической теплотехники была проведена работа по определению зависимостей теплоотвода от открытой поверхности вала в окружающую среду (воздух) при различной частоте его вращения.

На рис. 2 приведены результаты этих исследований, которые с достаточной точностью описываются с помощью следующей критериальной зависимости:

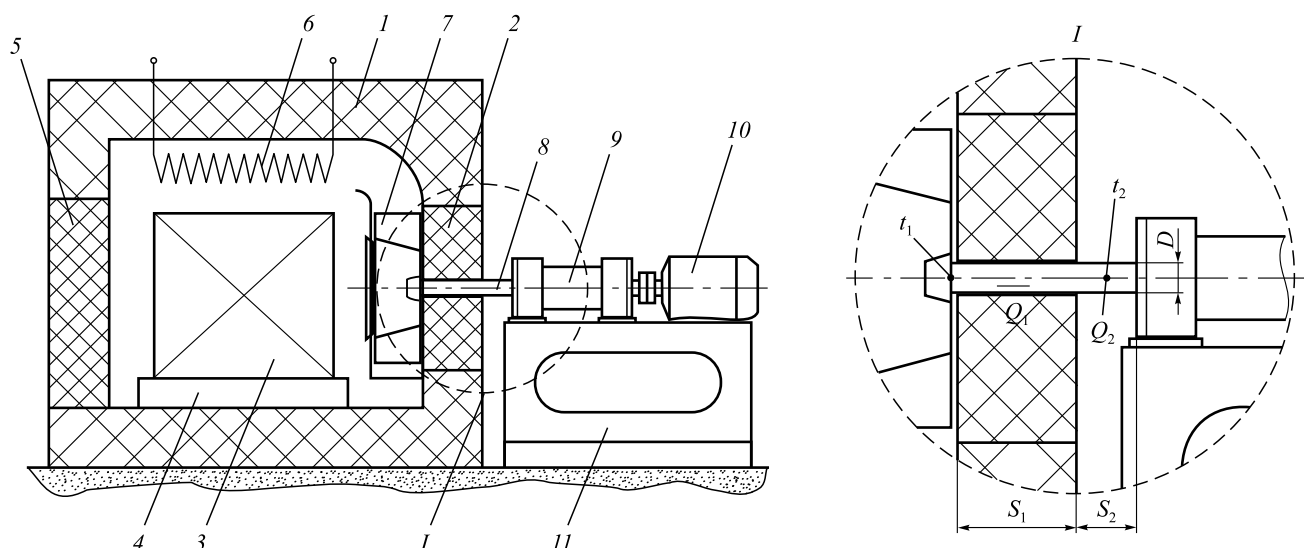


Рис. 1. Нагревательная конвективная печь, оборудованная высокотемпературным вентилятором:

1 – корпус с теплоизоляцией; 2 – теплоизолирующая стенка (пробка) вентилятора; 3 – обрабатываемый материал; 4 – подставка; 5 – загрузочная заслонка; 6 – нагреватель; 7 – рабочее колесо вентилятора; 8 – вал; 9 – узел подшипников; 10 – электродвигатель; 11 – подставка

Fig. 1. The heating convection furnace, equipped with high temperature fan:

1 – case with thermal insulation; 2 – thermal insulation wall (stopper) of the fan; 3 – processed material; 4 – stand; 5 – loading flap; 6 – heater; 7 – fan wheel; 8 – shaft; 9 – bearing assembly; 10 – electric motor; 11 – stand

$$Nu = 0,4964 Re^{0,583},$$

(1)

образующей вращающегося вала, м/с;  $n$  – угловая скорость вращения вала, 1/с;  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости окружающей среды, м<sup>2</sup>/с.

$$\text{где } Nu = \frac{\alpha D}{\lambda_b}; Re = \frac{DW}{\nu} = \frac{\pi D^2 n}{\nu}.$$

Здесь  $Nu$  – число Нуссельта;  $Re$  – число Рейнольдса;  $\alpha$  – средний коэффициент теплоотдачи от открытой поверхности вращающегося вала, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $D$  – диаметр вала, м;  $\lambda_b$  – коэффициент теплопроводности окружающей среды, Вт/(м·К);  $W$  – линейная скорость движения

На рис. 3 приведено сравнение величин коэффициентов теплоотдачи от поверхности вращающегося вала,

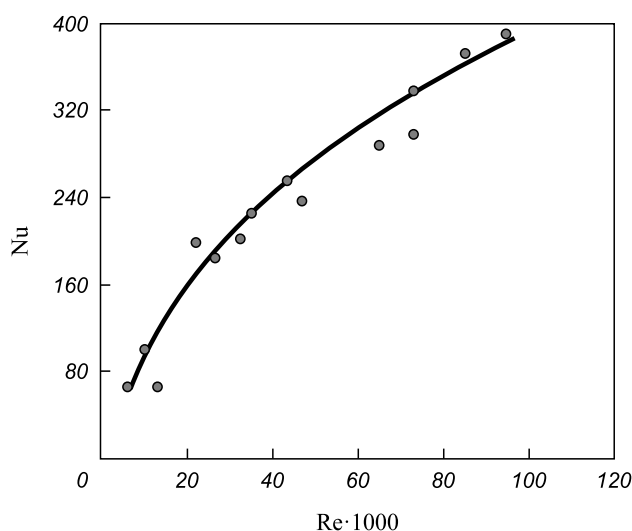


Рис. 2. Зависимость величины числа  $Nu$  от числа  $Re$  для условий конвективного теплообмена между поверхностью вращающегося вала печного вентилятора и окружающей средой

Fig. 2. The number  $Nu$  dependence on the number  $Re$  for convective heat exchange conditions between surface of the rotating furnace fan shaft and the environment

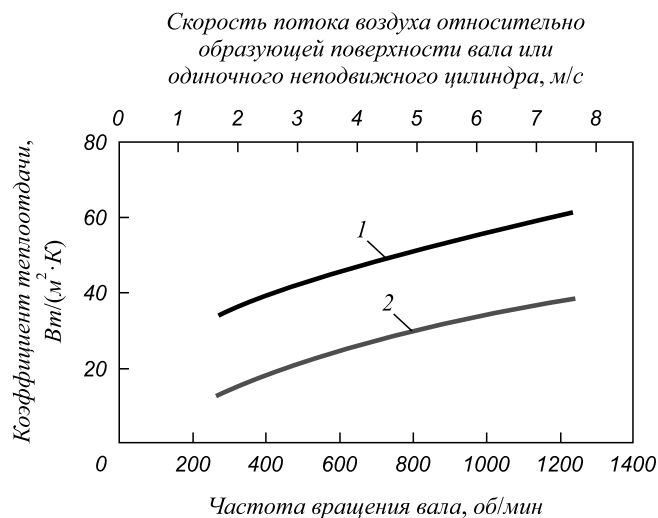


Рис. 3. Сравнение теплоотдачи от поверхности вращающегося вала и одиночного неподвижного цилиндра при поперечном направлении его обдува:

1 – вращающийся вал вентилятора диаметром 100 мм; 2 – одиночный неподвижный цилиндр диаметром 100 мм в поперечном потоке воздуха по данным работы [4]

Fig. 3. Comparison of heat transfer from the rotating shaft surface and a single fixed cylinder transverse direction of airflow:

1 – rotating shaft of the fan with diameter of 100 mm; 2 – single fixed cylinder with diameter of 100 mm in the transverse air flow according to [4]

полученных в ходе экспериментов, и одиночного неподвижного цилиндра при обтекании его потоком воздуха в поперечном направлении по данным работы [10] в сопоставимых условиях. Из анализа полученных результатов следует, что интенсивность теплообмена в первом случае на 40 – 50 % больше, чем во втором. Это явление, по-видимому, объясняется более сложным характером обтекания поверхности неподвижного цилиндра, где по мере движения газа вдоль образующей имеет место нарастание пограничного слоя с последующим срывом его в кормовой части. Необходимо отметить, что локальное значение коэффициента теплоотдачи на лобовой образующей цилиндра практически близко или совпадает с полученными значениями среднего коэффициента теплоотдачи от поверхности вращающегося вала.

Таким образом, в случае вращающегося вала интенсивность теплоотвода от его поверхности в окружающее пространство достаточно высока и, при этом, возрастает с увеличением частоты вращения.

Приближенный процесс охлаждения вала высокотемпературного вентилятора в установившемся стационарном тепловом режиме (см. рис. 1) описывается следующей системой уравнений:

$$Q_1 = \frac{\lambda_m}{S_1 + 0,5S_2} \frac{\pi D^2}{4} (t_1 - t_2);$$

$$Q = \alpha \pi D S_2 (t_2 - t_b); \quad Q_1 = Q_2, \quad (2)$$

где,  $Q_1$  – тепло, переносимое от нагретого конца вала к подшипникам за счет теплопроводности, Вт;  $Q_2$  – тепловой поток, рассеиваемый в окружающую среду с поверхности вращающегося вала на участке между наружной стенкой и ближним подшипником, Вт;  $D$  – диаметр вала, м;  $\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности материала вала, Вт/(м·К);  $\alpha$  – средний коэффициент теплоотдачи от открытой поверхности вращающегося вала, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $S_1$  – толщина теплоизолирующей стенки, м;  $S_2$  – длина открытого участка вала от стенки до ближайшего подшипника, м;  $t_1$  – температура нагретого конца вала, °С;  $t_2$  – средняя температура открытого участка вала от стенки до ближнего подшипника, °С;  $t_b$  – температура окружающей среды, °С.

В представленной расчетной методике сделаны следующие допущения:

- теплоотвод в окружающую среду от поверхности участка вала, проходящего через теплоизолированную стенку, отсутствует;
- в радиальном направлении вал рассматривается как термически тонкое тело;
- через открытую поверхность вала рассеивается весь тепловой поток, который приходит от нагретого конца за счет теплопроводности.

Система уравнений (2) имеет аналитическое решение, которое позволяет проводить расчетный анализ теплового состояния наиболее теплонегруженных частей

печного вентилятора в зависимости от его конструктивных особенностей и режимов работы.

На рис. 4 приведены расчетные зависимости изменения температуры в районе подшипников различных по диаметру валов вентиляторов от частоты их вращения по уравнению

$$t_2 = \frac{\frac{\lambda_m}{S_1 + 0,5S_2} \frac{\pi D^2}{4} t_1 + \alpha \pi D S_2 t_b}{\frac{\lambda_m}{S_1 + 0,5S_2} \frac{\pi D^2}{4} + \alpha \pi D S_2}. \quad (3)$$

При увеличении числа оборотов вращения вала в диапазоне от 100 до 600 об/мин температура нагрева подшипников интенсивно снижается. В случае дальнейшего повышения частоты вращения вала температура подшипников практически стабилизируется. Увеличение же диаметров с 50 до 150 мм при постоянной частоте их вращения (например, 500 об/мин) приводит к существенному росту температуры нагрева подшипников с 70 до 120 °С, что объясняется повышением (в 9 раз) площади поперечного сечения рассматриваемых валов.

Из представленного материала следует, что при установленной максимально допустимой температуре нагрева подшипников, например, 90 °С, длительная

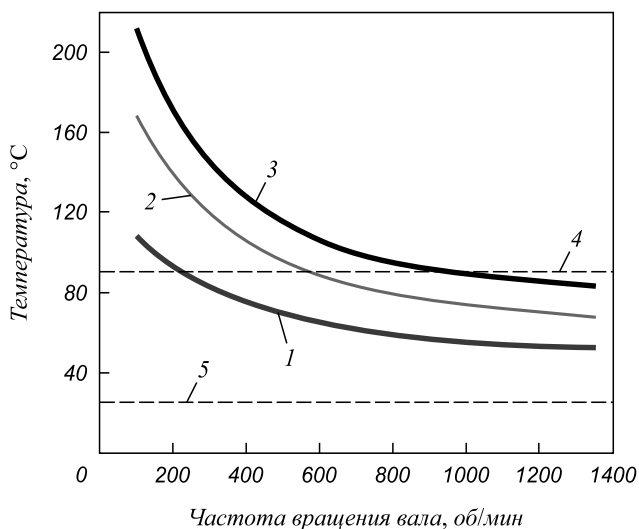


Рис. 4. Изменение температуры вала в районе подшипников в зависимости от его диаметра и частоты вращения при диаметре вала, мм: 1 – 50; 2 – 100; 3 – 150; 4 – предельно допустимая температура нагрева подшипников – 90 °С; 5 – температура окружающей среды  $t_b = 25$  °С; температура нагрева вала в печи  $t_1 = 500$  °С; толщина теплоизолированной стенки  $S_1 = 500$  мм; длина открытой части вала  $S_2 = 300$  мм

Fig. 4. The change of shaft temperature in the bearing area depending on its diameter and rotation speed.

Shaft diameter: 1 – 50 mm; 2 – 100 mm; 3 – 150 mm; 4 – maximum heating temperature of bearings – 90 °С; 5 – ambient temperature  $t_b = 25$  °С; heating temperature of the furnace shaft  $t_1 = 500$  °С; thermoinsulated wall of thickness  $S_1 = 500$  mm; length of the exposed portion of the shaft  $S_2 = 300$  mm

эксплуатация рассматриваемых вентиляторов невозможна при следующих частотах вращения:

- для вала диаметром 50 мм менее 200 об/мин;
- для вала диаметром 100 мм менее 600 об/мин;
- для вала диаметром 150 мм менее 1000 об/мин.

Из анализа расчетной зависимости (3) следует, что для снижения температуры нагрева подшипников при выбранной частоте вращения и диаметре вала необходимо увеличивать длину открытой поверхности вала или применять материалы с возможно меньшим коэффициентом теплопроводности. Кроме того, тепловой поток, распространяющийся вдоль вала теплопроводностью, может быть существенно снижен в случае использования полых конструкций трубчатого типа. В этом случае удастся уменьшить величину этого теплового потока в 1,5 – 2 раза за счет заполнения центральной полости вала газовой средой с высокими теплоизолирующими свойствами.

На рис. 5 приведены графики рассеиваемой тепловой мощности с открытой поверхности вала в зависимости от его диаметра и частоты вращения. С увеличением числа оборотов вентиляторов от 100 до 600 об/мин, независимо от величины диаметров их валов, рассеиваемое тепло в окружающее пространство существенно возрастает. При дальнейшем увеличении частоты вращения валов отводимый тепловой поток возрастает незначительно. Увеличение диаметров валов в 3 раза с 50 до 150 мм приводит к повышению теплоотвода в 5 – 7 раз в сопоставимых условиях.

**Выводы.** В ходе экспериментальных исследований получена критериальная зависимость конвективной теплоотдачи от открытой поверхности вала печного высокотемпературного вентилятора в окружающую среду при различной частоте его вращения. Показано, что в сопоставимых условиях средний коэффициент теплоотдачи от поверхности вращающегося вала на 40 – 60 % больше, чем при обдуве потоком воздуха в поперечном направлении одиночного неподвижного цилиндра.

Предложена приближенная методика расчета охлаждения вала и выведена математическая формула, пригодная для расчета температуры вала в районе подшипников в зависимости от конструктивных параметров вентилятора и режимов его работы.

Расчетами также показано, что увеличение диаметра вала с 50 до 150 мм при прочих равных условиях приводит к повышению нагрева подшипников в 1,5 – 2 раза и увеличению рассеиваемого тепла в окружающую среду в 5 – 7 раз.

Представленные материалы могут быть использованы при разработке высокотемпературных вентиляторов для нагревательных и термических печей.

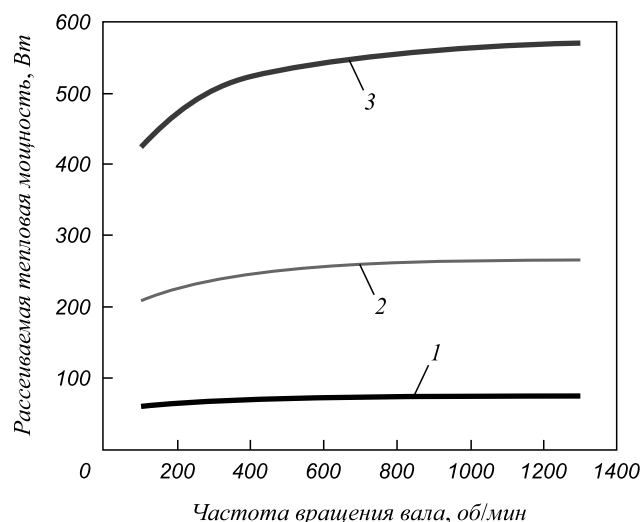


Рис. 5. Рассеиваемая тепловая мощность с открытой поверхности вала в зависимости от его диаметра и частоты вращения при диаметре вала, мм:

1 – 50; 2 – 100; 3 – 150; температура окружающей среды  $t_a = 25^\circ\text{C}$ ; температура нагрева вала в печи  $t_1 = 500^\circ\text{C}$ ; толщина теплоизолированной стенки  $S_1 = 500$  мм; длина открытой части вала  $S_2 = 300$  мм

Fig. 5. The thermal power dissipation from a shaft open surface depending on shaft diameter and rotation speed.

Shaft diameter: 1 – 50 mm; 2 – 100 mm; 3 – 150 mm; ambient temperature  $t_a = 25^\circ\text{C}$ ; heating temperature of the furnace shaft  $t_1 = 500^\circ\text{C}$ ; thermoinsulated wall of thickness  $S_1 = 500$  mm; length of the exposed portion of the shaft  $S_2 = 300$  mm

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дружинин Г.М., Ашихмин А.А., Маслов П.В. и др. Термическая печь с комбинированной системой отопления // *Сталь*. 2015. № 3. С. 70 – 74.
2. Зайнуллин Л.А., Калганов М.В., Калганов Д.В. и др. Создание печных электронагревателей с радиационно-конвективным способом теплообмена // *Сталь*. 2015. № 3. С. 75 – 77.
3. Аптерман В.Н., Тымчак В.М. Протяжные печи. – М.: Металлургия, 1969. – 320 с.
4. Зайнуллин Л.А., Калганов М.В., Калганов Д.В. и др. Печь теплового обезжиривания стеклосетки, оборудованная радиационно-конвективными электронагревателями // *Сталь*. 2015. № 3. С. 80 – 82.
5. Соломахова Т.С., Чебышева К.В. Центробежные вентиляторы: Справочник. – М.: Машиностроение, 1980. – 175 с.
6. Пат. 2467077 РФ. Способ термической обработки лифтовых труб малого диаметра типа «труба в трубе» / В.М. Калганов, Л.А. Зайнуллин, Д.В. Мехряков и др.; заявл. 26.12.2011; опубл. 20.11.2012. Бюл. № 32.
7. Bloom W. Jet heat reparation of waste furnace gases on strip lines // *Iron and Steel Engineer*. 1979. No. 12. P. 32 – 37.
8. Martin H. Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces // *Advances in Heat Transfer*. 1977. Vol. 13. P. 1 – 60.
9. Launder B. E., Rodi W. The turbulent wall jet // *Prog. Aerospace Science*. 1981. Vol. 19. P. 81 – 128.
10. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1977. – 343 с.

Поступила 19 июня 2015 г.

## INVESTIGATION OF COOLING EFFICIENCY OF THE ROTATING HIGH TEMPERATURE FURNACE FAN

**Zainullin L.A.<sup>1</sup>**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, General Director  
(aup@vniimt.ru)

**Kalaganov M.V.<sup>1</sup>**, Research Associate

**Kalaganov D.V.<sup>1</sup>**, Research Associate

**Yarchuk V.F.<sup>2</sup>**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the  
Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

<sup>1</sup> OJSC “Scientific Research Institute of Metallurgical Heat Engineering” (“VNIIMT”) (16, Studencheskaya str., Ekaterinburg, 620137, 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 experimental dependence of convective heat transfer from the open surface of the high-temperature furnace fan shaft to an environment at a different frequency of its rotation was obtained. It is shown that under comparable conditions the average heat transfer coefficient of the rotating shaft surface is 40 – 60 % higher than for single fixed cylinder being blown with air flow in the transverse direction. The method of rotating shaft cooling calculating is proposed and the mathematical formula that is suitable for estimating the bearings area temperature depending on fan design parameters and furnace operations is obtained. Calculations have shown that the shaft rotation speed increasing rapidly decreases bearings heating temperature in the range of 100 to 600 rpm. In case of further increase of the shaft speed the bearing temperature is almost stabilized. From the analysis of proposed estimated dependence that reduces the bearings heating at the selected speed and diameter of the shaft it is necessary to increase the shaft open surface length or to use materials with the least possible thermal conductivity. The presented dependencies can be used to develop high-temperature fans for heating and heat treatment furnaces.

**Keywords:** high-temperature furnace fan, convective heat transfer, fan shaft and bearings cooling.

## REFERENCES

1. Druzhinin G.M., Ashikhmin A.A., Maslov P.V., Popov A.B., Loshkarev N.B., Galkin S.A. Furnace with a hybrid heating system. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 3, pp. 216–220.
2. Zainullin L.A., Kalaganov M.V., Kalaganov D.V., Loshkarev N.B., Fatkhutdinov A.R., Pugin A.I. Furnace electric heaters with radiant-convective heat transfer. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 3, pp. 221–223.
3. Apterman V.N. Tymchak V.M. *Protyazhnye pechi* [Strand-type furnaces]. Moscow: Metallurgiya. 1969, 320 p. (In Russ.).
4. Zainullin L.A., Kalaganov M.V., Kalaganov D.V., Spirin N.A., Dzyubailo R.V., Li V.A. Furnace of thermal degreasing of fiberglass, equipped with radiation-convection electric heaters. *Stal'*, 2015, no. 3, pp. 80–82. (In Russ.).
5. Solomakhova T.S., Chebysheva K.V. *Tsentrobezhnye ventilyatory: spravochnik* [Centrifugal fans: Reference book]. Moscow: Mashinostroenie. 1980, 175 p. (In Russ.).
6. Kalaganov V.M., Zainullin L.A., Mekhryakov D.V. etc. *Sposob termicheskoi obrabotki liftovykh trub malogo diametra tipa «truba v trube»* [A method of heat treating of a small diameter tubing such as “pipe in pipe”]. Patent RF no. 2467077 RF, MPK C 21 D 9/08 (2006.01), F 21 B 17/00 (2006.01), F 27 D 7/04 (2006.01). 2012, *Byulleten' izobretenii*, no. 32 (In Russ.).
7. Bloom W. Jet heat reparation of waste furnace gases on strip lines. *Iron and Steel Engineer*, 1979, no. 12, pp. 32–37.
8. Martin H. Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces. *Advances in Heat Transfer*, 1977. Vol. 13, pp. 1–60.
9. Launder B.E., Rodi W. The turbulent wall jet. *Prog. Aerospace Science*, 1981. Vol. 19, pp. 81–128.
10. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Osnovy teploperedachi* [Basics of heat transfer]. Moscow: Energiya. 1977, 343 p. (In Russ.).

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-662-666

Received June 19, 2015

УДК 669.045

## МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЖНОГО ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ КАМЕРНОЙ ПЕЧИ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ ДЛИННОМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

**Казяев М.Д.**, к.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

**Вохмяков А.В.**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

**Киселев Е.В.**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика  
в металлургии» (kiselev\_tim@mail.ru)

**Спитченко Д.И.**, аспирант кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

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

**Аннотация.** Расчет внешнего теплообмена в пламенных печах всегда осложняется недостаточными сведениями о характеристиках конвективного теплообмена. Особенно важно знать указанные характеристики в связи с применением на современных нагревательных печах скоростных горелок, обеспечивающих истечение газовоздушной смеси со скоростью 100 – 150 м/с. Представлена методика и результаты исследования сложного внешнего теплообмена на действующей промышленной печи, оснащенной скоростными рекуперативными горелками и футерованной керамоволокнистыми блоками. Даны рекомендации по применению представленной методики и результатов исследований.

**Ключевые слова:** вертикальная камерная печь, рекуперативные скоростные горелки, конвективный теплообмен, методика исследований, результат расчетов, рекомендации.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-667-671

Современные нагревательные и термические печи оснащают скоростными горелками, обеспечивающими высокие скорости движения газов в рабочем пространстве и, как следствие, усиление конвективной составляющей сложного внешнего теплообмена.

В целях совершенствования методов расчета тепловой работы печей необходимо иметь данные о характеристиках теплообмена, получаемых при экспериментальных исследованиях.

Такие исследования были проведены на вертикальной печи для термообработки роторов турбин, представленной на рис. 1.

Футеровка печи выполнена из керамоволокнистых блоков. Печь оснащена двенадцатью скоростными рекуперативными горелками фирмы Elster Kromchroeder номинальной тепловой мощностью 250 кВт каждая.

Исследования тепловой работы печи проводили при нагреве поковки ротора турбины массой 28 т с целью нормализации по сложному режиму, приведенному на рис. 2.

На поверхность поковки были установлены восемь термпар, а в рабочем пространстве печи в каждой из пяти зон управления находились две термпары. По их показаниям были проведены расчеты осредненных температур греющей среды и металла на различных временных участках температурного режима.

Ниже приведена методика исследования сложного внешнего теплообмена, позволяющая рассчитывать пе-

редачу теплоты от печной среды к поверхности металла отдельно для лучистой и конвективной составляющих внешнего теплообмена.

На каждом временном участке рассчитывается приращение среднemasовой температуры поковки ротора и по ней определяется количество теплоты, полученное металлом:

$$\Delta Q_m = G_m \bar{c}_m \Delta t_m, \text{ кДж.} \quad (1)$$

Далее рассчитывается плотность суммарного теплового потока, воспринятого металлом

$$\bar{q}_{m\Sigma} = \frac{\Delta Q_m}{F_m \Delta \tau}, \text{ кВт/м}^2, \quad (2)$$

где  $G_m$  – масса металла, кг;  $\bar{c}_m$  – средняя теплоемкость металла, кДж/(кгК);  $\Delta t_m$  – приращение среднemasовой температуры металла, °С;  $F_m$  – поверхность металла, м<sup>2</sup>;  $\Delta \tau$  – интервал времени нагрева металла на каждом этапе подъема температуры печи, с.

При наличии величины  $\bar{q}_{m\Sigma}$  можно рассчитать средний суммарный коэффициент теплообмена между рабочим пространством печи и поверхностью металла (по балансу теплоты)

$$\bar{\alpha}_\Sigma = \frac{\bar{q}_{m\Sigma}}{t_{\text{печ}} - t_{\text{пов}}}, \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (3)$$

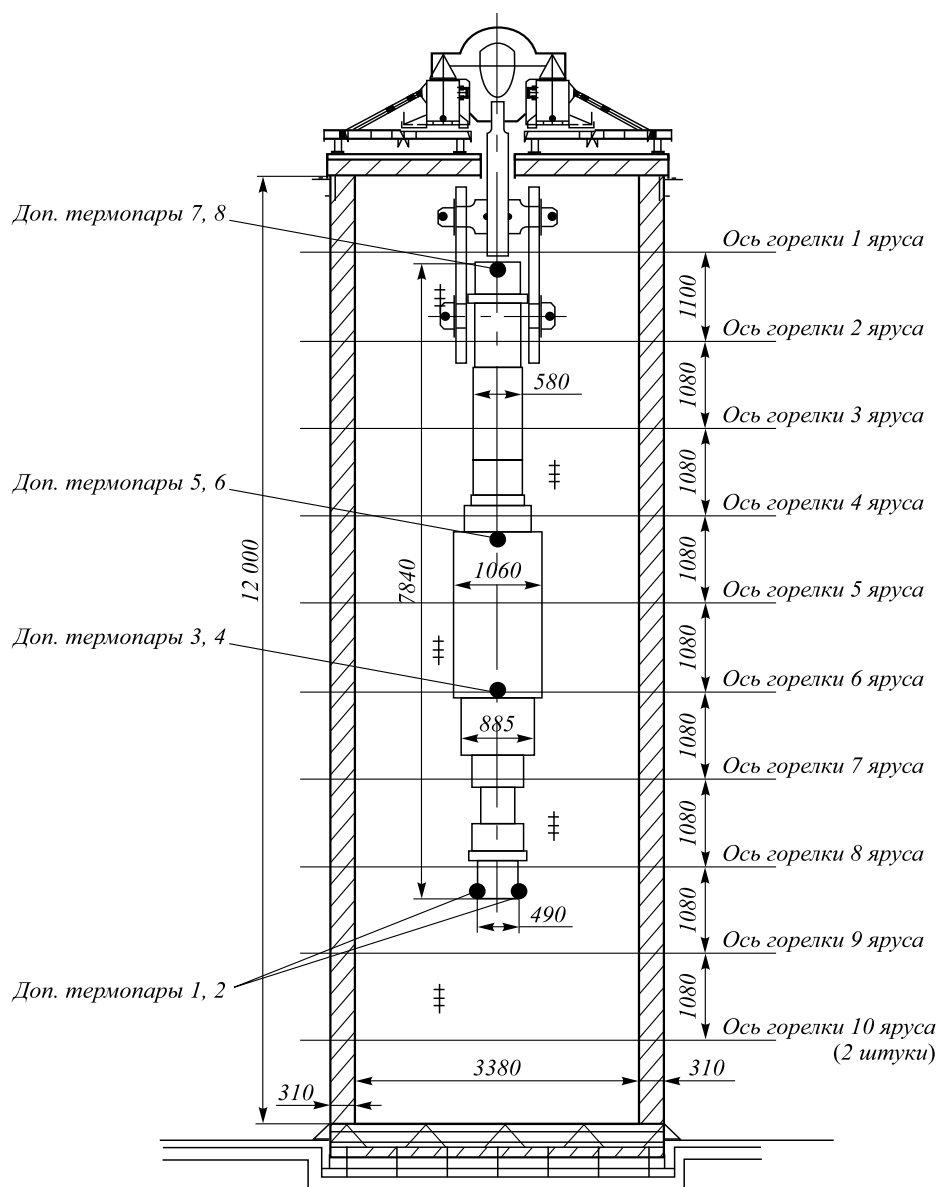


Рис. 1. Схема вертикальной термической печи с установкой опытного ротора массой 28 т и размещение основных (печных) и дополнительных термопар

Fig. 1. Scheme of the vertical heat-treating furnace equipped with a pilot rotor of 28 ton and location of the main (furnace) and additional thermocouples

Затем, по известным геометрическим и теплофизическим характеристикам печи, можно рассчитать среднюю плотность теплового потока излучением

$$\bar{q}_{м.л} = C_{гкм} \left[ \left( \frac{\bar{T}_{печ}}{100} \right)^4 - \left( \frac{\bar{T}_{пов}}{100} \right)^4 \right], \text{ кВт/м}^2, \quad (4)$$

где  $C_{гкм}$  – приведенный коэффициент излучения в системе газ–кладка–металл, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Лучистый тепловой поток позволяет рассчитать коэффициент лучистого теплообмена

$$\bar{\alpha}_л = \frac{\bar{q}_{м.л}}{\bar{t}_{печ} - \bar{t}_{пов}}, \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (5)$$

По разности между  $\bar{q}_{м.с}$  и  $\bar{q}_{м.л}$  можно определить плотность теплового потока конвекцией

$$\bar{q}_{м.к} = \bar{q}_{м.с} - \bar{q}_{м.л} \quad (6)$$

и далее – коэффициент конвективного теплообмена

$$\bar{\alpha}_{м.к} = \frac{\bar{q}_{м.к}}{\bar{t}_{печ} - \bar{t}_{пов}}, \text{ кВт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (7)$$

Учитывая сложный температурный режим печи и переменное поперечное сечение поковки ротора, производили расчет средней суммарной плотности теплового потока для всей поковки с учетом долевого массового коэффициента каждой части изделия, для каждой

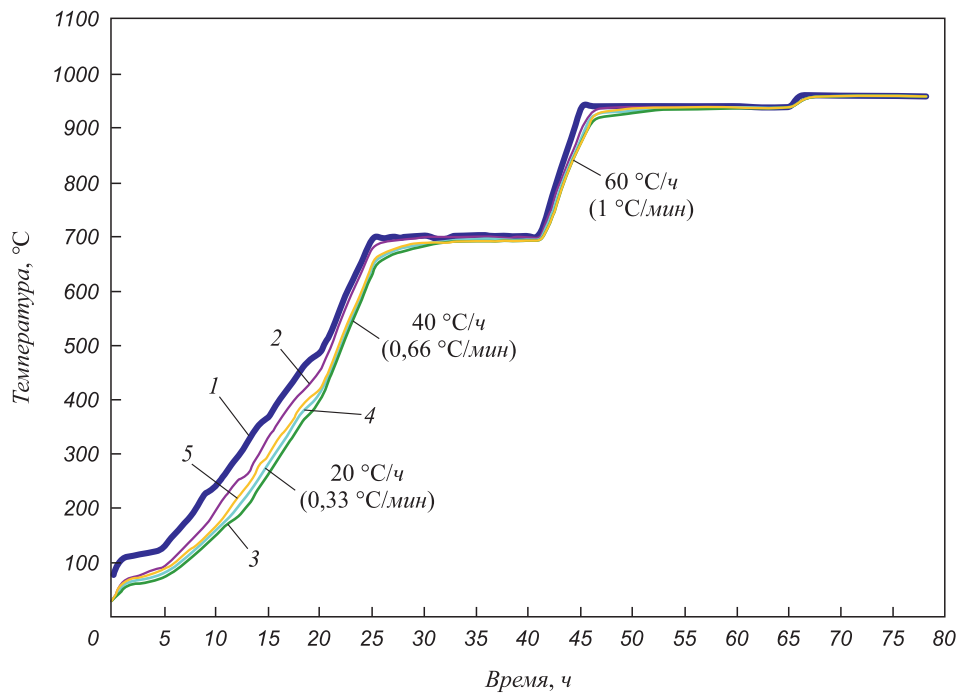


Рис. 2. Температурный режим печи при нагреве ротора массой 28 т при средней температуре:  
1 – по рабочему пространству без нижней зоны; 2 – по металлу, первая зона; 3 – по металлу, вторая зона; 4 – по металлу, третья зона; 5 – по металлу, четвертая зона

Fig. 2. Temperature furnace conditions at heating of a rotor of 28 ton at a mass average temperature of:  
1 – the workspace without the lower zone; 2 – metal, the first zone; 3 – metal, the second zone; 4 – metal, the third zone; 5 – metal, the fourth zone

зоны печи в отдельности и для каждого температурного интервала нагрева:

$$\bar{q}_{\Sigma} = \left( \frac{G_1}{G_{\Sigma}} \right)_I q_{\Sigma I} + \left( \frac{G_2}{G_{\Sigma}} \right)_{II} q_{\Sigma II} + \left( \frac{G_3}{G_{\Sigma}} \right)_{III} q_{\Sigma III} + \left( \frac{G_4}{G_{\Sigma}} \right)_{IV} q_{\Sigma IV}, \quad (8)$$

где  $\left( \frac{G_1}{G_{\Sigma}} \right)_I \dots \left( \frac{G_4}{G_{\Sigma}} \right)_{IV}$  – долевые массовые коэффициенты каждой части поковки ротора в каждой зоне печи;  $G_{\Sigma}$  – масса всей поковки ротора;  $q_{\Sigma I} \dots q_{\Sigma IV}$  – значения плотностей суммарных тепловых потоков в каждой зоне печи, рассчитанные по показаниям термопар, установленных на металле и в рабочем пространстве печи.

Среднее значение лучистой составляющей внешнего теплообмена рассчитывали для всей печи с учетом долевого поверхностного коэффициента каждой части изделия, для каждой зоны печи в отдельности и для каждого температурного интервала нагрева:

$$\bar{q}_{\Sigma} = \left( \frac{F_1}{F_{\Sigma}} \right)_I q_{\Sigma I} + \left( \frac{F_2}{F_{\Sigma}} \right)_{II} q_{\Sigma II} + \left( \frac{F_3}{F_{\Sigma}} \right)_{III} q_{\Sigma III} + \left( \frac{F_4}{F_{\Sigma}} \right)_{IV} q_{\Sigma IV}, \quad (8)$$

где  $\left( \frac{F_1}{F_{\Sigma}} \right)_I \dots \left( \frac{F_4}{F_{\Sigma}} \right)_{IV}$  – долевые поверхностные коэффициенты каждой части поковки ротора в каждой зоне печи;  $F_{\Sigma}$  – общая площадь поверхности поковки ротора;  $q_{\Sigma I} \dots q_{\Sigma IV}$  – расчетные значения плотностей тепловых потоков излучением для каждой части изделия в каждой зоне печи.

В таблице приведены результаты измерений и расчета параметров теплообмена в камерной вертикальной печи, оснащенной скоростными рекуперативными горелками.

Анализ данных таблицы позволяет сделать некоторые выводы, касающиеся расчета теплообмена в камерной печи.

Прежде всего, следует констатировать тот факт, что применение скоростных горелок резко увеличивает конвективную составляющую внешнего теплообмена: доля конвекции в общем внешнем теплообмене в данном случае составляет в среднем во всем интервале температур 61 %.

С ростом температуры печи увеличиваются обе составляющие внешнего теплообмена: лучистая на 35 – 40 %, конвективная на 60 – 65 %.

Объяснением этому может быть увеличение скорости нагрева ротора по мере перехода от нагрева при температуре печи в интервале 100 – 500 °C к нагреву в интервале 700 – 940 °C, при котором возрастает тепловая нагрузка печи и происходит увеличение коли-

# Результаты измерений и расчета параметров теплообмена в камерной вертикальной печи

## The results of measurements and calculation of heat exchange parameters in the vertical chamber furnace

| Интервал температур печи, °С | Средние температуры, °С |             | Плотности тепловых потоков, Вт/м <sup>2</sup> |                 |                 | Коэффициенты теплообмена, Вт/(м <sup>2</sup> ·К) |                  | $\frac{q_{м.к}}{q_{м.л}}$ |
|------------------------------|-------------------------|-------------|-----------------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------------------|------------------|---------------------------|
|                              | $\bar{t}_r$             | $\bar{t}_n$ | $\bar{q}_{м.с}$                               | $\bar{q}_{м.л}$ | $\bar{q}_{м.к}$ | $\bar{\alpha}_л$                                 | $\bar{\alpha}_к$ |                           |
| 100 – 500                    | 311                     | 239         | 4143                                          | 1556            | 2587            | 21,6                                             | 35,9             | 1,663                     |
| 500 – 700                    | 616                     | 563         | 12 270                                        | 4297            | 7973            | 81,1                                             | 150,4            | 1,855                     |
| 700 – 940                    | 820                     | 788         | 11 466                                        | 4921            | 6545            | 153,8                                            | 204,5            | 1,330                     |

чества продуктов сгорания и кратности циркуляции газов. Как показали исследования тепловой работы других типов печей, кратность циркуляции газов, создаваемая скоростными горелками, может составлять  $K_ц = 8 - 12$  [1 – 8].

Следует подчеркнуть, что полученные соотношения конвективной и лучистой составляющих внешнего теплообмена можно применять для расчетов суммарных плотностей тепловых потоков только в случаях, подобных конструктивной обстановке, изображенной на рис. 1, которая характеризуется низким коэффициентом заполнения рабочего пространства печи металлом

$$K_з = \frac{V_м}{V_{р.п}},$$

где  $V_м$  – объем нагреваемого металла, м<sup>3</sup>;  $V_{р.п}$  – объем рабочего пространства печи, м<sup>3</sup>.

В данном случае коэффициент заполнения рабочего пространства вертикальной печи составлял  $K_з = 0,045$ .

Следует также отметить, что вертикальные термические печи всегда работают с низкими коэффициентами заполнения рабочего пространства металлом. Это обусловлено тепловой обработкой индивидуальной металлической продукции (роторов турбин, крупных валков прокатных станов и др.), которая требует особо качественного нагрева с высокой степенью равномерности температуры печных газов и поверхности нагреваемого металла, что вообще характерно для камерных печей с изменяющейся рабочей температурой, и особенно для печей термической обработки изделий.

Поскольку расчет конвективного теплообмена в сложной конструктивной обстановке всегда представляет большие трудности, то получение экспериментальных данных на действующих печах является необходимой и важной работой.

Представленный материал исследований является частью общего направления изучения конвективного теплообмена в печах различных конструкций, проводимого на кафедре теплофизики и информатики в металлургии Уральского федерального университета.

Получение большого количества данных о соотношении конвективной и лучистой составляющих внешнего теплообмена позволяет более точно рассчитывать суммарные тепловые потоки, передаваемые нагреваемому металлу, используя расчет лучистого теплообмена

$$q_{м.с} = q_{м.л} \left( 1 + \frac{q_{м.к}}{q_{м.л}} \right),$$

где  $q_{м.л}$  – расчетная плотность теплового потока излучением;  $\frac{q_{м.к}}{q_{м.л}}$  – экспериментально полученное соотношение конвективной и лучистой составляющих внешнего теплообмена.

Рассмотренная в данной работе тема особенно важна при конструировании современных камерных печей с изменяющейся рабочей температурой, оснащаемых скоростными горелками, создающими прецедент резкого увеличения конвективной составляющей теплообмена. Поэтому любые экспериментальные исследования, проводимые на действующих печах, позволяют развивать и совершенствовать теорию теплообмена и разрабатывать новые конструкции современных печей, обеспечивающих качественный и производительный нагрев металла.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казяев М.Д., Вохмяков А.М., Киселев Е.В. и др. Исследование тепловой работы камерных вертикальных термических печей с различными системами отопления и конструкциями футеровок. – В кн.: Сб. тр. Междунар. науч.-практич. конф. «Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло». В 2-х частях. Ч. 1. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 246 – 259.
2. Казяев М.Д., Вохмяков А.М., Киселев Е.В. и др. Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология: Сб. матер. VII Междунар. науч.-практич. конф., посвященной 150-летию великого русского металлурга В.Е. Грум-Гржимайло. – М: Издательский дом МИСиС, 2014. С. 224 – 235.
3. Спитченко Д.И., Вохмяков А.М., Казяев М.Д. и др. Техническое перевооружение вертикальной камерной печи для термической обработки крупных поковок: Сб. докл. Междунар. науч.-практич. конф. «Теория и практика тепловых процессов в металлургии». – Екатеринбург: УрФУ, 2012. С. 367 – 370.

4. Михеев М.А., Михеева И.М. Краткий курс теплопередачи. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 208 с.
5. Зобнин Б.Ф. Нагревательные печи. – М.: Машиностроение, 1964. – 311 с.
6. Теплотехнические расчеты металлургических печей. / Под ред. А.С. Телегина. – М.: Металлургия, 1982. – 358 с.
7. Гусовский В.Г., Лившиц А.Е. Методики расчета нагревательных и термических печей. – М.: Теплотехник, 2004. – 395 с.
8. Расчет нагревательных и термических печей. / Под ред. В.М. Тымчака, В.Л. Гусовского. – М.: Металлургия, 1983. – 481 с.

Поступила 7 июля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 9, pp. 667–671.

## COMPLICATED EXTERNAL HEAT EXCHANGE IN THE VERTICAL CHAMBER FURNACE DESIGNED FOR HEAT TREATMENT OF LONG PRODUCTS

**Kazyayev M.D.**, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

**Vokhmyakov A.V.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

**Kiselev E.V.**, Cand. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”  
(kiselev\_tim@mail.ru)

**Spitchenko D.I.**, Postgraduate of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

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

**Abstract.** Calculation of the external heat exchange in the combustion furnaces is always complicated because of insufficient knowledge of the convective heat transfer characteristics. It is extremely important to know the above-mentioned characteristics as the modern heating furnaces are equipped with the high-speed burners providing for running of the gas-air mixture at a speed of 100 – 150 m/sec. The present article demonstrates a procedure and results of the investigation of the complicated external heat transfer in the operating industrial furnace equipped with high-speed recuperative burners and lined with ceramic-and-fibrous blocks. The article also includes the recommendations on application of the submitted procedure and results of the above-mentioned investigations.

**Keywords:** vertical chamber furnace, high-speed recuperative burners, convective heat transfer, procedure of investigations, results of calculations, recommendations.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-667-671

### REFERENCES

1. Kazyayev M.D., Vokhmyakov A.M., Kiselev E.V., Spitchenko D.I., Kazyayev D.M., Eremin A.O. Investigation of thermal work of chamber vertical heat treatment furnaces with different heating systems and lining designs. In: *Sb. trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Tvorcheskoe nasledie V.E. Grum-Grzhimailo»* [Papers of International scientific and practical conference «Artistic legacy of V.Ye. Grum-Grzhymaylo»]. Part. 1. Ekaterinburg: UrFU, 2014, pp. 246–259. (In Russ.).
2. Kazyayev M.D., Vokhmyakov A.M., Kiselev E.V., Spitchenko D.I., Kazyayev D.M. Energy-saving technologies in the industry. Furnace units. Ecology. In: *Sb. materialov VII Mezhdunarodnoi nauchno-praktich. konf. posvyashchennoi 150-letiyu velikogo russkogo metallurga V.E. Grum-Grzhimailo* [Materials of the 7th International Scientific-and- Practical conference dedicated the 150th anniversary of V.E. Groom-Grzhimailo, the famous Russian metallurgist]. Moscow: Izdatel'skii dom MISiS. NITU «MISiS», 2014, pp. 224–235. (In Russ.).
3. Spitchenko D.I., Vokhmyakov A.M., Kazyayev M.D., Kiselev E.V., Kazyayev D.M. Modernization of vertical chamber furnace for heat treatment of large forgings. In: *Sb. dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-praktich. konf. “Teoriya i praktika teplovykh protsessov v metallurgii”* [Materials of the International Scientific-and-Practical Conference “Theory and Practice of Thermal Processes in Metallurgy”]. Ekaterinburg: UrFU, 2012, pp. 367–370. (In Russ.).
4. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Kratkii kurs teploperedachi* [A brief course of heat transfer]. Moscow, Leningrad: Gosenergoizdat, 1960, 208 p. (In Russ.).
5. Zobnin B.F. *Nagrevatel'nye pechi* [Heating furnaces]. Moscow: Mashinostroenie, 1964, 311 p. (In Russ.).
6. *Teplotekhnicheskie raschety metallurgicheskikh pechei* [Thermotechnical calculation the metallurgical furnaces]. Tegin A.S. ed. Moscow: Metallurgiya, 1982, 358 p. (In Russ.).
7. Gusovskii V.G., Livshits A.E. *Metodiki rascheta nagrevatel'nykh i termicheskikh pechei* [Procedures of the heating and heat-treating furnace calculation]. Moscow: Teplotekhnika, 2004, 395 p. (In Russ.).
8. *Raschet nagrevatel'nykh i termicheskikh pechei* [Calculation of the heating and heat-treating furnaces]. Tymchak V.M., Gusovskii V.L. eds. Moscow: Metallurgiya, 1983, 481 p. (In Russ.).

Received July 7, 2015

## НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛООБМЕН В ЗОНЕ РАСПЛАВА И ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

**Ярошенко Ю.Г.**, д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

**Швыдкий В.С.**, д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

**Спири́н Н.А.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теплофизика и информатика  
в металлургии» (n.a.spirin@urfu.ru)

**Лавров В.В.**, д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

**Носков В.Ю.**, старший преподаватель кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

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

**Аннотация.** Сформулирована задача нестационарного теплообмена в зоне расплава доменной печи, учитывающая особенности процесса фильтрации чугуна и шлака через коксовую насадку. Общая закономерность заключается в аperiодическом (не колебательном) характере переходных процессов теплообмена в слое. Однако это положение справедливо только при условии постоянства отношения теплоемкостей потоков материалов и газа по высоте рассматриваемого участка слоя, что в полной мере не отражает характера развития теплообменных процессов по высоте доменной печи. Показано, что аperiодический (неколебательный) переходный процесс в доменной печи наблюдается в том случае, если возмущение оказывает одинаковое по знаку воздействие на нижнюю и верхнюю ступени теплообмена, а колебательный – если оно оказывает противоположное влияние на эти зоны теплообмена. Величина перерегулирования при этом будет тем больше, чем существеннее по величине и по знаку это различие.

**Ключевые слова:** доменный процесс, теплообмен, зона расплава, математическое моделирование, переходные процессы.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-672-676

Технология выплавки чугуна в доменных печах является наиболее сложной. Эффективность этой технологии во многом определяется знаниями закономерностей развития тепловых и физико-химических явлений по высоте печи, уровень которых позволяет непрерывно совершенствовать приемы управления аэродинамическим и тепловым режимами доменной плавки. В последнее время исследователями разных стран много внимания уделялось изучению состояния температурных полей, полей скоростей, концентраций  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$  по высоте печи [1, 2]. Благодаря результатам этих исследований удалось получить новые или уточнить существующие знания о протекании взаимосвязанных между собой тепловых, физико-химических процессов, а также процессов движения газов и материалов. Важно отметить, что эти исследования относились к изучению стационарных состояний процесса доменной плавки, когда все ее параметры не изменялись во времени.

В реальных условиях работы доменной печи любое изменение параметров плавки – рудной нагрузки, состава дутья, его температуры, влажности и других является нарушением (возмущением) стационарного состояния, в результате чего возникает переходный процесс к новому стационарному состоянию. Переходные процессы в доменных печах, связанные с перестройкой темпера-

турных и концентрационных полей, полей давления и скоростей газа, носят нестационарный характер.

Наибольшее влияние на уровень устойчивости режимов работы доменной печи оказывают переходные процессы, определяющие тепловое состояние, особенно в высокотемпературной зоне (в области заплечиков и горна), зоне, где формируются продукты плавки, их качественные и количественные характеристики, определяющие технико-экономические показатели технологии производства чугуна.

В зависимости от вида и знака возмущения, например, нарушающего тепловое состояние горна, возможны либо его разогрев, либо его похолодание. Если возникли возмущения по нескольким параметрам, то протекание переходных процессов существенно усложняется. Опытные представления о характере и продолжительности переходных процессов не раскрывают всей картины перестройки полей главных параметров доменной плавки. Подобная ограниченность может быть устранена изучением переходных процессов в доменной печи методами математического моделирования [3 – 6].

Для исследования закономерностей перестройки температурных полей в зоне расплава, необходимо было получить представления об изменении температур кокса, чугуна, шлака на различных горизонтах по

высоте зоны расплава. При постановке задачи нестационарного теплообмена в нижней части доменной печи за основу была принята схема движения материалов и газов, представленная в работах [6 – 9]. В соответствии с принятой схемой в зоне расплава происходит нагрев газом трех составляющих шихты – кокса, чугуна и шлака, причем каждая из них, в свою очередь, пребывает в состоянии теплообмена между собой. В этой зоне развиты как конвективные процессы теплообмена, так и процессы лучистого теплообмена (тепловое излучение). Конвективный теплообмен имеет место между газом и коксом, газом и чугуном, газом и шлаком, а также между шлаком и коксом, поскольку стекающий по коксу шлак частично покрывает его поверхность, а лучистый теплообмен происходит между тремя компонентами шихты: коксом, чугуном и шлаком.

В такой постановке математически задача описывается следующей системой уравнений:

– для кокса, чугуна, шлака

$$c_{iM}\rho_{iM}\frac{\partial t_i}{\partial \tau} + c_{iM}\rho_{iM}w_{iM}\frac{\partial t_i}{\partial y} = \frac{\alpha_{Fi}}{m'_i}f_{iM}(T - t_i) + \sum_{k=1}^{k=3} C_{\text{прик}} \left[ \left( \frac{t_k + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_i + 273}{100} \right)^4 \right] + \sum_{k=1}^{k=3} \alpha_i f_i (t_k - t_i); \quad (1)$$

– для газа

$$c_r\rho_r w_r \frac{\partial T}{\partial y} = \sum_{i=1}^{i=k} f_{iM} \frac{\alpha_{Fi}}{m'_i} (T - t_i) \quad (2)$$

с граничными и начальными условиями

$$y = 0, \quad t_i = t'_i(\tau); \quad y = y_0, \quad T = T'(\tau); \quad (3)$$

$$\tau = 0, \quad t_i = \Phi(y), \quad (4)$$

где  $y$  – текущая координата по высоте слоя;  $w$  – скорость, м/с;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha_F$ ,  $\alpha_i$  – коэффициенты конвективного теплообмена, кВт/(м<sup>2</sup>·К);  $c$  – теплоемкость, кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $m'_i$  – коэффициент массивности;  $C_{\text{прик}}$  – приведенный коэффициент излучения, кВт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $f$  – удельная поверхность, м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>;  $T$ ,  $t$  – температура газа и материалов соответственно, °С; индексы:  $i = 1$  для кокса;  $i = 2$  для чугуна;  $i = 3$  для шлака;  $г$  – для газа;  $м$  – для материала.

Решение системы дифференциальных уравнений осуществлялось численным методом прямых.

Плотности орошения расплавом при выполнении расчетов определяли по производительности печи и выходу шлака. Средние скорости опускания коксовой насадки при расчете стационарного температурного поля принимали пропорциональными количеству кокса, сгорающего у фурм и расходуемого на науглероживание чугуна.

С целью учета изменения кажущейся теплоемкости за счет процессов плавления, прямого восстановления и науглероживания чугуна было принято допущение, что плавление железорудных материалов происходило мгновенно. Это позволило соответствующий тепловой эффект отнести к кажущейся теплоемкости чугуна и шлака пропорционально их количеству на входе в зону плавления. Затраты тепла на прямое восстановление отнесли к кажущейся теплоемкости кокса, а тепловой эффект науглероживания железа – к кажущейся теплоемкости чугуна. По высоте слоя распределение затрат тепла было принято равномерным. Кажущиеся теплоемкости материалов определяли методом последовательного приближения и коррекции отношения тепловых эффектов химических реакций к температурному интервалу нагрева каждого из потоков. Температура плавления железорудных материалов принималась равной 1250 °С, а температура газа на входе в теплообмен – 1900 °С. Коэффициенты конвективного и лучистого теплообмена определялись по данным работ [1, 6, 9].

Адаптацию модели проводили по варианту расчета стационарного распределения температур по высоте зоны расплава (рис. 1). Поскольку прямое сопоставление рассчитанных температур с действительными в зоне расплава произвести невозможно в силу сложности промышленного эксперимента, то достоверность полученных расчетом результатов оценивали по фактической конечной температуре чугуна и шлака на вы-

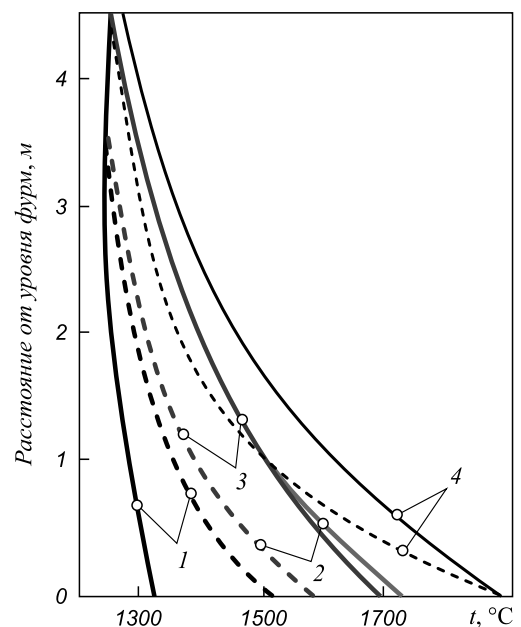


Рис. 1. Стационарные температурные поля чугуна (1), кокса (2), шлака (3) и газа (4) по высоте зоны расплава с учетом взаимного лучистого теплообмена между потоками (пунктирные линии) и без такого учета (сплошные линии)

Fig. 1. Stationary temperature fields of pig-iron (1), coke (2), slag (3) and gas (4) at the height of liquid phase zone taking into account mutual radiant heat exchange between streams (dashed lines) and without such account (continuous lines)

пусках. При этом учитывали, что температура кокса, поступающего в зону горения, близка к температуре шлака, а температура чугуна ниже температуры шлака на 40 – 60 °С [1]. Подобное различие температур получили и в результате расчета, что подтвердило правомерность допущений, принятых в модели.

При анализе результатов моделирования было установлено, что лучистый теплообмен в нижней части доменной печи действительно существенен. Так, разность температур между чугуном и коксом без учета лучистого теплообмена составляла 400 °С, а с его учетом – 80 °С. В свою очередь, вследствие интенсивного конвективного теплообмена между шлаком и коксом их температуры оказались близкими и различие между ними составило 5 – 10 °С.

На следующем этапе анализа исследовали переходные процессы при ступенчатом изменении температуры газа в фурменных очагах с 1900 до 2100 °С. При таком возмущении было отмечено, что температура чугуна, шлака и кокса повысилась на 60 – 70 °С. Изменения температуры шлака (кокса) и чугуна в переходном процессе приводили к единичному возмущению и были представлены в относительных единицах (рис. 2).

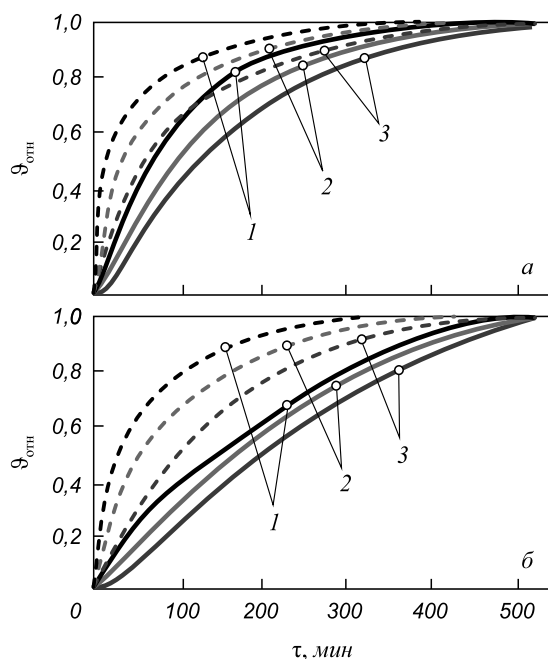


Рис. 2. Изменение температуры чугуна (сплошные линии), кокса и шлака (пунктирные линии) в переходном процессе при ступенчатом изменении температуры газа на входе в теплообмен с учетом (а) и без учета (б) теплообмена излучением на расстоянии от уровня фурм, м:  
1 – 0,1; 2 – 0,5; 3 – 1,0

Fig. 2. Change of temperature of pig-iron (continuous lines), coke and slag (dashed lines) in transient at step change of temperature of gas on an input in heat exchange with the account (a) and without the account (b) heat exchange by radiation on the distance from tuyeres level, m:  
1 – 0,1; 2 – 0,5; 3 – 1,0

Поэтому справедливо условие: при  $\tau \rightarrow \infty$  на всех горизонтах по высоте слоя  $\theta_{\text{отн}} = \frac{t_i(y) - t_i^0(y)}{t_i^\infty(y) - t_i^0(y)}$ , где  $t_i(y)$ ,  $t_i^0(y)$  и  $t_i^\infty(y)$  соответственно текущее, начальное и конечное (установившиеся) значение температур для  $i$ -го материала на данном горизонте слоя. Анализ результатов математического моделирования показал, что на разных горизонтах инерционность процессов неодинакова и возрастает от нижних горизонтов к верхним, что обусловлено различием тепловых потоков от газа к материалу по высоте зоны расплава. На уровне фурм, где существует максимальная разность температур газа и материалов, а, следовательно, и максимальная величина теплового потока, скорость нагрева (охлаждения) материалов максимальна. Моделирование также было выполнено в двух вариантах: с учетом лучистого теплообмена и без учета этого явления. Установлено, что лучистый теплообмен выравнивает скорости нагрева потока материалов и охлаждения потока газа. Учет лучистого теплообмена необходим при исследовании закономерностей деформации температурных полей в переходных и квазистационарных режимах. В то же время учет различий в теплофизических свойствах кокса, чугуна, шлака и взаимного лучистого теплообмена между ними не оказывает заметного влияния на общую длительность переходных процессов.

Следует отметить, что общая закономерность, которая обобщает результаты по математическому моделированию процессов нестационарного теплообмена в слое, заключается в аperiodическом (неколебательном) характере переходных процессов. Однако это положение справедливо только при условии постоянства отношения теплоемкостей потоков материалов и газа по высоте рассматриваемого участка слоя, что в полной мере не отражает характера развития теплообменных процессов по высоте доменной печи. В связи с этим результаты моделирования нестационарного теплообмена в слое, учитывающие тепловые эффекты при восстановлении, дают лишь количественную оценку длительности переходных процессов и общие представления об их характере в отдельных участках слоя, но не для печи в целом.

Выполнить более глубокий анализ можно только с использованием полных динамических моделей, позволяющих учитывать основные явления в доменной печи от уровня засыпи до уровня чугунных леток. Такой анализ был осуществлен Б.А. Боковиковым и В.И. Мойкиным с использованием математической модели доменного процесса (модель ВНИИМТ) [6] (рис. 3). В этих работах показано, что переходный процесс, оцениваемый по содержанию кремния в чугуне, имеет аperiodический (неколебательный) характер по каналу рудной нагрузки, когда при увеличении (уменьшении) последней содержание кремния в чугуне и его температура

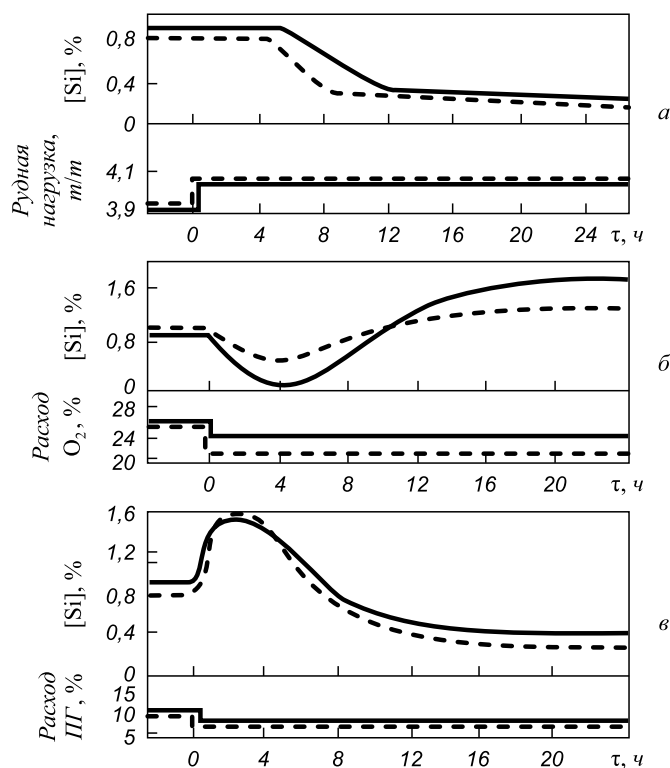


Рис. 3. Изменение содержания кремния в чугуна при ступенчатом изменении рудной нагрузки (а), расхода кислорода (б) и расхода природного газа (в)

Fig. 3. Change of the silicon content in pig-iron at step change of ore loading (a), the oxygen expense (б) and the natural gas expense (в)

монотонно падают (возрастают) и стремятся к новому установившемуся значению.

Однако при оценке по расходу природного газа и технологического кислорода такого апериодического характера переходного процесса не наблюдается. Переходный процесс для этих случаев носит знакопеременный (колебательный) характер. Если в первый момент времени после снижения содержания кислорода в дутье температура в горне также снижается, что приводит к уменьшению содержания кремния в чугуна, то после прохождения примерно одного оборота материалов происходит разогрев продуктов плавки за счет снижения скорости опускания материалов, повышения температуры в шахте и увеличения степени восстановления в верхней ступени теплообмена.

Противоположная картина возникает при снижении расхода природного газа. В начальный момент времени в результате повышения температуры в горне содержание кремния в чугуна возрастает, однако по истечении времени, равного одному обороту материалов,

доменная печь начинает холодеть. Это обусловлено увеличением скорости схода материалов, уменьшением степени их восстановления в шахте из-за снижения в этом участке печи температуры как газа, так и шихты, а также уменьшения содержания водорода в восстановительном газе.

**Выводы.** Лучистый теплообмен выравнивает скорости нагрева (охлаждения) потоков и учет его необходим при исследовании закономерностей деформации температурных полей в переходных и квазистационарных режимах. Колебательный переходный процесс в доменной печи наблюдается в том случае, если после нанесения возмущения оно будет оказывать противоположное влияние на тепловое состояние нижней и верхней ступеней теплообмена. Значение показателя перерегулирования при этом будет тем больше, чем существеннее по величине и по знаку это различие.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Металлургия чугуна: Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп./ Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев и др.; Под ред. Ю.С. Юсфина. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 774 с.
2. Теплообмен и повышение эффективности доменной плавки / Н.А. Спирин, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: УГТУ, 1995. – 242 с.
3. De Castro Jose Adilson, Nogami Hiroshi, Yagi Jun-ichiro. Transient mathematical model of blast furnace based on multi-fluid concept, with application to high operation // ISIJ International. 2000. Vol. 40. No. 7. P. 637 – 646.
4. Chew Sheng Jason, Zulli Paul, Yu Aibing. Modelling of liquid flow the blast furnace: Theoretical analysis of the effects of gas, liquid and packing properties // ISIJ International. 2001. Vol. 41. No. 10. P. 1112 – 1121.
5. JianXu, Sheng-li Wu, Xin-yingGuo, Kai-ping Du. Numerical simulation on dynamic and static holdups of powder inside pre-reduction shaft furnace. Technical contribution to the 6th International congress on the science and technology of ironmaking – ICSTI, 42nd International Meeting on ironmaking and 13th International Symposium on Iron Ore, October 14th to 18th, 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, P. 414 – 424.
6. Нестационарные процессы и повышение эффективности доменной плавки / Ю.Н. Овчинников, В.И. Мойкин, Н.А. Спирин, Б.А. Боковиков. – Челябинск: Металлургия, 1989. – 120 с.
7. Восстановление, теплообмен и гидродинамика в доменном процессе / Под ред. С.В. Шаврина // Труды института металлургии УФАН СССР. Ч. 1. Вып. 24. 1970. – 130 с. Ч. 2. Вып. 26. 1972. – 140 с.
8. Онорин О.П., Гладышев В.И., Каплун Л.И. Фильтрация железистых шлаковых расплавов через коксовую насадку // Изв. вуз. Черная металлургия. 1997. № 2. С. 11 – 14.
9. Мысик А.Ф., Кукаркин А.С., Китаев Б.И., Бабушкин Н.М. Исследование теплообмена в орошаемом слое кусковых материалов // Изв. вуз. Черная металлургия. 1975. № 2. С. 125 – 128

Поступила 10 апреля 2015 г.

## DISPLACEABLE HEAT EXCHANGE IN THE SMELTING ZONE AND FEATURES OF TRANSIENTS IN BLAST FURNACE

**Yaroshenko Yu.G.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

**Shvydkii V.S.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

**Spirin N.A.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”  
(n.a.spirin@urfu.ru)

**Lavrov V.V.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

**Noskov V.Yu.**, Senior Lecturer of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

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

**Abstract.** The problem of non-stationary heat exchange in smelting zone of the blast furnace, considering features of process of a filtration of pig-iron and slag through coke nozzle was formulated. Blanket law consists in not oscillatory character of transients of heat exchange in a course. However this position is fair only under condition of a constancy of the relation of thermal capacities of streams of materials and gas on height of a considered site of a course that does not fully reflect the character of development processes exchange of heat at blast furnace height. It is shown, that not oscillatory transient in a blast furnace is observed if the indignation influences identically on a sign the bottom and top steps of heat interchange, and oscillatory – if it makes the opposite impact on these zones of the heat interchange. Thus the reregulation size will be that more than more essentially on size and on a sign this distinction is.

**Keywords:** blast-furnace process, heat exchange, smelting zone, mathematical modeling, transients.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-672-676

### REFERENCES

1. Vegman E.F., Zhrebina B.N., Pokhvisnev A.N., Yusfin Yu.S., Kur-nov I.F., Paren'kov A.E., Chernousov P.I. *Metallurgiya chuguna: uchebnyk dlya vuzov* [Ironmaking: Textbook for universities]. Yus-fin Yu.S. ed. Moscow: Akademkniga. 2004. 774 p. (In Russ.).
2. Spirin N.A., Ovchinnikov Yu.N., Shvydkii B.C., Yaroshenko Yu.G. *Teploobmen i povyshenie effektivnosti domennoi plavki* [Heat ex-change and efficiency upgrading of blast-furnace melting]. Ekate-rinburg: izd. UGTU – UPI, 1995. 242 p. (In Russ.).
3. De Castro Jose Adilson, Nogami Hiroshi, Yagi Jun-ichiro. Transient mathematical model of blast furnace based on multi-fluid concept, with application to high operation. *ISIJ International*. 2000. Vol. 40, no. 7, pp. 637–646.
4. Chew Sheng Jason, Zulli Paul, Yu Aibing. Modelling of liquid flow the blast furnace: Theoretical analysis of the effects of gas, liquid and packing properties. *ISIJ International*. 2001. Vol. 41, no. 10, pp. 1112–1121.
5. Jian Xu, Sheng-li Wu, Xin-ying Guo, Kai-ping Du. Numerical sim-ulation on dynamic and static holdups of powder inside pre-reduc-tion shaft furnace. *Technical contribution to the 6th International congress on the science and technology of ironmaking – ICSTI, 42nd International Meeting on ironmaking and 13th International Sym-posium on Iron Ore*, October 14th to 18th, 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, pp. 414–424.
6. Ovchinnikov Yu.N., Moikin V.I., Spirin N.A., Bokovikov B.A. *Nestatsionarnye protsessy i povyshenie effektivnosti domennoi plavki* [Displaceable processes and improving the efficiency of blast fur-nace melting]. Chelyabinsk: Metallurgiya, 1989, 120 p. (In Russ.).
7. *Vosstanovlenie, teploobmen i gidrodinamika v domennom protsesse* [Restore, heat transfer and hydrodynamics in blast furnace process]. Shavrin S.V. ed. Trudy instituta metallurgii UFAN SSSR. Part. 1, Is-sue 24, 1970. 130 p. Part. 2, Issue 26, 1972. 140 p. (In Russ.).
8. Onorin O.P., Gladyshev V.I., Kaplun L.I. Filtering of ferrous slag melts through the coke packing. *Izvestiya VUZov. Chernaya metal-lurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1997, no. 2, pp. 11–14. (In Russ.).
9. Mysik A.F., Kukarkin A.S., Kitaev B.I., Babushkin N.M. The in-vestigation of heat transfer in the fluidized layer of lumpy materials. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Met-allurgy*. 1975, no. 2, pp. 125–128. (In Russ.).

Received April 10, 2015

УДК 669.017.7:621.78-976

## ВЛИЯНИЕ Al И Si НА ОБРАЗОВАНИЕ АУСТЕНИТА В МЕЖКРИТИЧЕСКОМ ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР В Cr–Ni–Mo-СТАЛИ\*

*Гервасьев М.А., д.т.н., профессор, зав. кафедрой металловедения*

*Юровских А.С., к.т.н., доцент кафедры «Термообработка*

*и физика металлов» (artem.yurovskikh@mail.ru)*

*Беликов С.В., к.т.н., доцент кафедры «Термообработка и физика металлов»*

*Маслова О.В., ст. преподаватель кафедры металловедения*

*Жилин А.С. к.т.н., доцент кафедры металловедения (zh-al@yandex.ru)*

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

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

**Аннотация.** В работе проанализировано влияние дополнительного легирования алюминием и кремнием стали 35ХН1М2ФА с целью изучения влияния указанных легирующих элементов на процессы образования аустенита. Сталь 35ХН1М2ФА, используемая в тяжелом и энергомашиностроении, была выбрана для изучения в связи с необходимостью дополнительного улучшения комплекса механических свойств, в особенности пластичности и ударной вязкости. Методом высокотемпературного структурного анализа получены данные о соотношении  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фаз в анализируемых сплавах. На основании результатов исследования рассчитаны критические точки  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$  и сделан вывод о том, что дополнительное легирование алюминием стали 35ХН1М2ФА приводит к расширению межкритического интервала температур, в то время как дополнительное введение кремния в сталь смещает межкритический интервал температур в высокотемпературную область. Изучение изменения параметра кристаллической решетки аустенита показало, что ее минимальный параметр в стали 35ХН1М2ФА наблюдается при температуре 740 °С. Кремний, и в особенности алюминий, повышают эту температуру до 760 и 780 °С соответственно.

**Ключевые слова:** аустенит, хромо-никель-молибденовая сталь, легирование, алюминий, кремний.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-677-681

Закалка из межкритического интервала температур  $A_{c1} - A_{c3}$  с получением двухфазной феррито-мартенситной структуры является эффективным способом повышения комплекса механических свойств, в особенности пластичности и ударной вязкости [1 – 3]. Образование двухфазной области связано со значительным перераспределением углерода между фазами, причем при разных температурах межкритического интервала это перераспределение изменяется [2 – 3]. Кроме перераспределения углерода обнаружено изменение концентрации легирующих элементов в  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фазах. В частности, изменение концентрации фосфора приводит к отсутствию отпускной хрупкости в сталях [2 – 3].

Ранее закалка из межкритического интервала использовалась в автомобилестроении исключительно как стадия термической обработки малоуглеродистых сталей, что обеспечивало глубокую вытяжку, высокое качество штампуемой поверхности и повышенную прочность [1]. Применение закалки из межкритического интервала для среднеуглеродистых комплексно-легированных сталей затруднено в связи с тем, что межкритический интервал имеет сравнительно узкую температурную область. Однако авторами работ [4 – 7]

показано, что легирование ферритообразующими элементами Si и Al приводит к расширению указанной температурной области.

Целью настоящей работы являлось изучение влияния легирования кремнием и алюминием на ширину межкритического интервала температур в среднеуглеродистых комплексно-легированных сталях с оценкой перераспределения углерода между фазами при аустенитизации.

В качестве материала выбрана промышленная сталь для ответственных крупных поковок 35ХН1М2ФА. В дополнение к ней были выплавлены две стали: одна, легированная 1 % Al, и вторая, легированная 1 % Si. Химический состав сталей приведен в табл. 1. Основным методом анализа образования аустенита в межкритическом интервале температур являлся метод высокотемпературного рентгеноструктурного анализа, в результате которого определялось соотношение  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фаз при нагревании, а также проводилась оценка параметров их кристаллических решеток. Анализ проводился на дифрактометре Bruker D8 Advance в диапазоне углов дифракции  $2\theta = 48 - 101^\circ$  в излучении  $K\alpha$  Co с шагом  $0,04^\circ$  с использованием позиционно-чувствительного детектора LynxEye, эквивалентное время на шаг 93 с.

\* Авторы работы выражают благодарность за активное участие в работе студентам Т. Акепишевой и В. Филиппию.

Таблица 1

Химический состав сталей, % (по массе)

Table 1. Chemical composition of the analyzed steels

| Марка стали | C    | Si   | Mn   | Cr   | Ni   | Mo   | Al   | V    |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 35XH1M2ФА   | 0,39 | 0,25 | 0,78 | 1,65 | 1,31 | 0,46 | 0,01 | 0,13 |
| 35XH1M2ФСА  | 0,36 | 0,96 | 0,60 | 1,45 | 1,32 | 0,42 | 0,01 | 0,11 |
| 35XH1M2ФЮА  | 0,36 | 0,27 | 0,54 | 1,39 | 1,48 | 0,42 | 0,84 | 0,10 |

По данным рентгенограмм сталей (рис. 1) видно, что интенсивность линий  $\alpha$ -фазы с повышением температуры уменьшается, а  $\gamma$ -фазы увеличивается, вместе с этим основные линии  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фаз не только изменяют свою интенсивность, но и в незначительной степени смещаются, что свидетельствует об изменении параметра кристаллических решеток этих фаз. На основании полученных данных построена зависимость изменения объемной доли  $\alpha$ - и  $\gamma$ -фаз от температуры при нагревании в области, включающей межкуритический интервал (рис. 2). Полученные результаты доказывают, что основное количество аустенита образуется вблизи точки  $A_{c1}$ , что соответствует превращению перлита в аустенит. Дальнейшее повышение температуры приводит к исчезновению избыточного феррита и полной аустенитизации сталей. Данное поведение в большей степени характерно для сталей, легированных алюминием и кремнием (рис. 2).

По данным рентгенограмм определены критические точки для исследуемых сталей (табл. 2). Разница в значениях  $A_{c1}$  и  $A_{c3}$  связана с различным размером образ-

цов и скоростью их нагрева. Показано, что алюминий расширяет межкуритический интервал температур, а кремний сдвигает его в область более высоких температур.

Проанализировано изменение параметра кристаллической решетки феррита при нагревании (рис. 3). Параметр кристаллической решетки феррита также снят при комнатной температуре. Во всем диапазоне температур наблюдается линейная зависимость параметра кристаллической решетки от температуры для всех исследуемых сталей, что связано с термическим расширением кристаллической решетки феррита и не позволяет сделать вывод о количественном перераспределении углерода.

Анализ изменения параметра кристаллической решетки аустенита при температурах до 700 °С показал полное соответствие с теоретическими представлениями о фазовых превращениях в классических системах Fe–C (рис. 4). Дальнейший нагрев приводит к уменьшению концентрации углерода до концентрации углерода в стали. Действительно, при темпера-

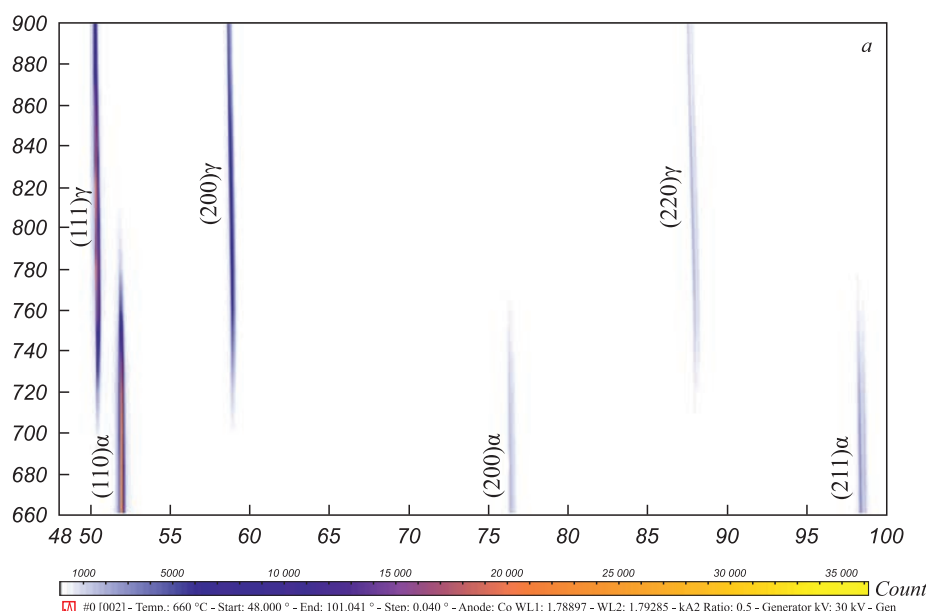


Рис. 1. Рентгенограммы анализируемых сталей:  
а – 35XH1M2ФА

Fig. 1. X-ray pictures of the analyzed steels:  
а – 35KhN1M2FA

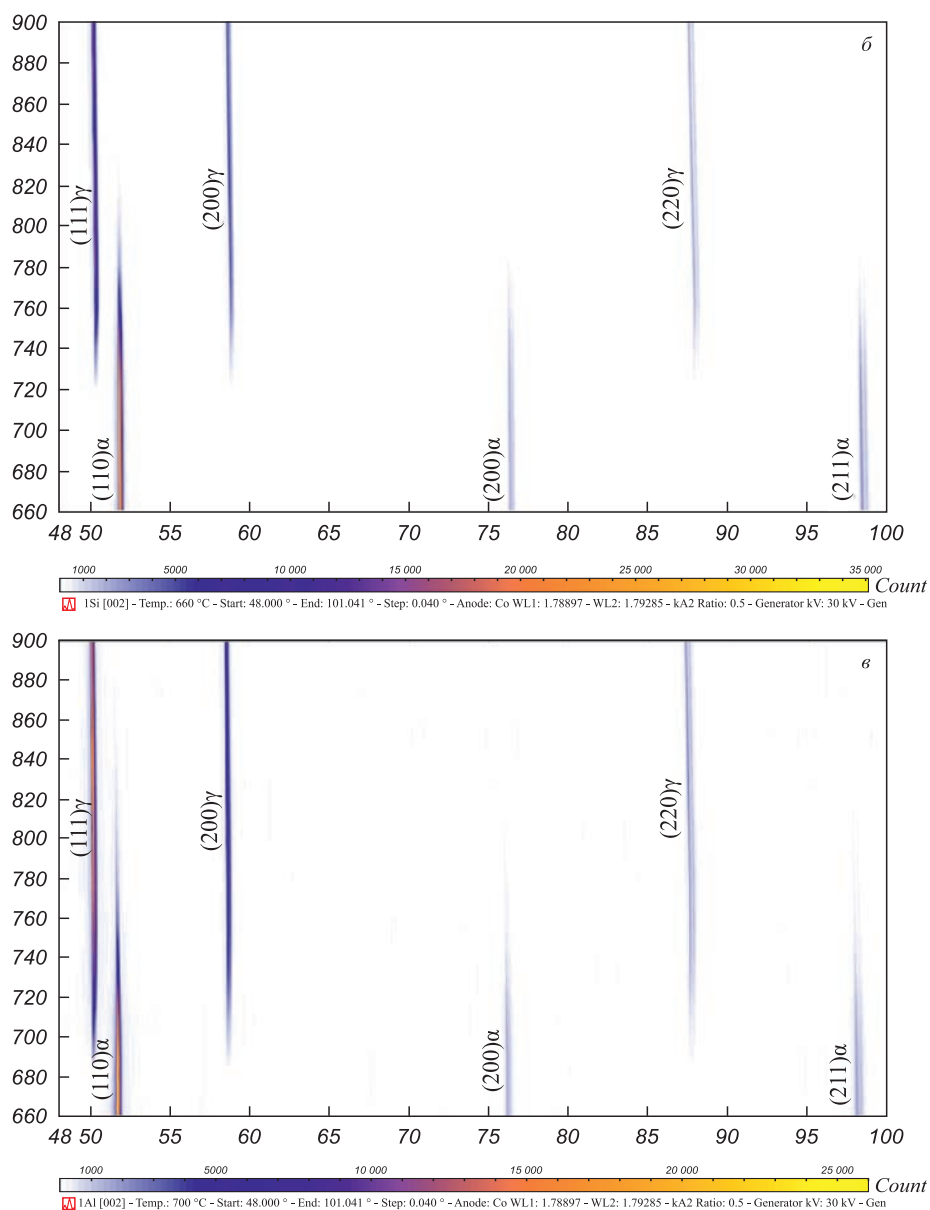


Рис. 1 (продолжение). Рентгенограммы анализируемых сталей:

б – 35XN1M2ΦСА; в – 35XN1M2ΦЮА

Fig. 1. X-ray pictures of the analyzed steels:

б – 35KhN1M2FSA; в – 35KhN1M2FYuA

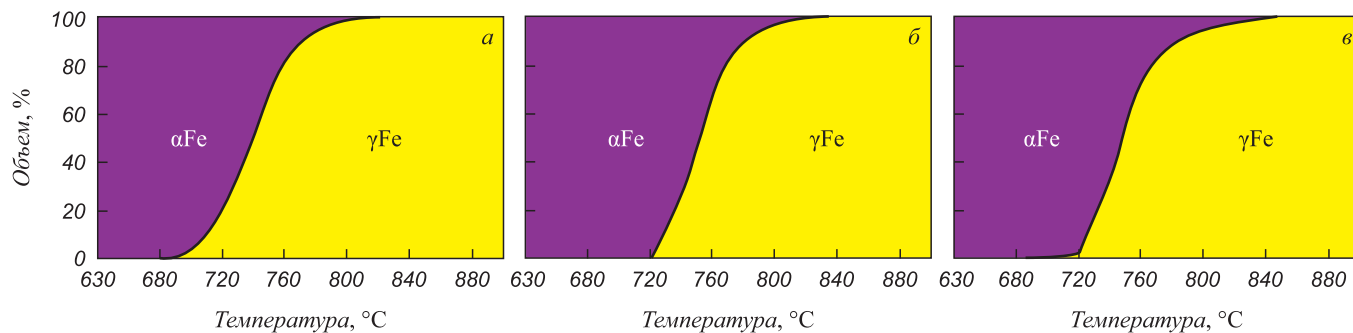


Рис. 2. Зависимость соотношения объемных долей α- и γ-фаз от температуры:

а – 35XN1M2ΦА; б – 35XN1M2ΦСА; в – 35XN1M2ΦЮА

Fig. 2. Dependence of volume percentage of α- and γ-phases from temperature:

а – 35KhN1M2FA; б – 35KhN1M2FSA; в – 35KhN1M2FYuA

Таблица 2

Критические точки анализируемых сталей

Table 2. Critical points of the analyzed steels

| Марка стали | $A_{c1}$ | $A_{c3}$ |
|-------------|----------|----------|
| 35ХН1М2ФА   | 680      | 820      |
| 35ХН1М2ФСА  | 720      | 840      |
| 35ХН1М2ФЮА  | 680      | 860      |

турах, близких к  $A_{c1}$ , параметр кристаллической решетки аустенита несколько снижается. Минимальный параметр кристаллической решетки аустенита в стали 35ХН1М2ФА наблюдается при температуре 740 °С. Кремний и, в особенности, алюминий повышают эту температуру до 760 и 780 °С соответственно. Данное резкое увеличение параметра кристаллической решетки аустенита может быть обусловлено несколькими

причинами. Во-первых, оказывает влияние термическое расширение кристаллической решетки в целом. Во-вторых, происходит растворение карбидных фаз, образованных сильными карбидообразующими элементами, такими как хром, молибден и ванадий. Процессы растворения карбидных фаз приводят к увеличению концентрации углерода в  $\gamma$ -твердом растворе и последующему увеличению параметра кристаллической решетки аустенита.

Таким образом показано, что дополнительное легирование алюминием стали 35ХН1М2ФА приводит к расширению межкритического интервала температур, в то время как дополнительное введение кремния в сталь смещает межкритический интервал температур в высокотемпературную область.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гервасьев М.А., Кутыин А.Б. Хладостойкие стали для крупных поковок и отливок. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010. – 219 с.

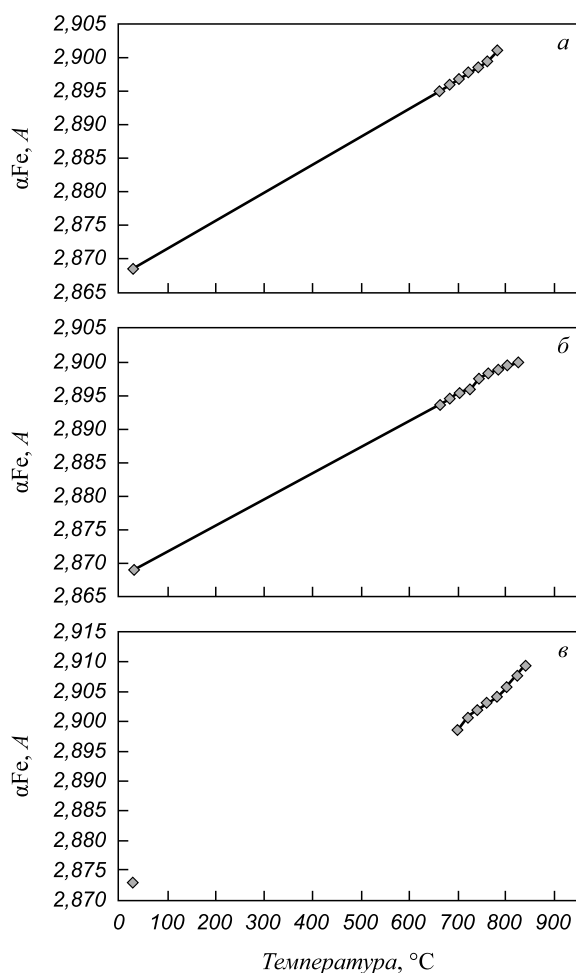


Рис. 3. Изменение параметра кристаллической решетки феррита при нагревании для анализируемых сталей:  
а – 35ХН1М2ФА; б – 35ХН1М2ФСА; в – 35ХН1М2ФЮА

Fig. 3. Lattice constant behavior of ferrite under heating for the analyzed steels:  
а – 35KhN1M2FA; б – 35KhN1M2FSA; в – 35KhN1M2FYuA

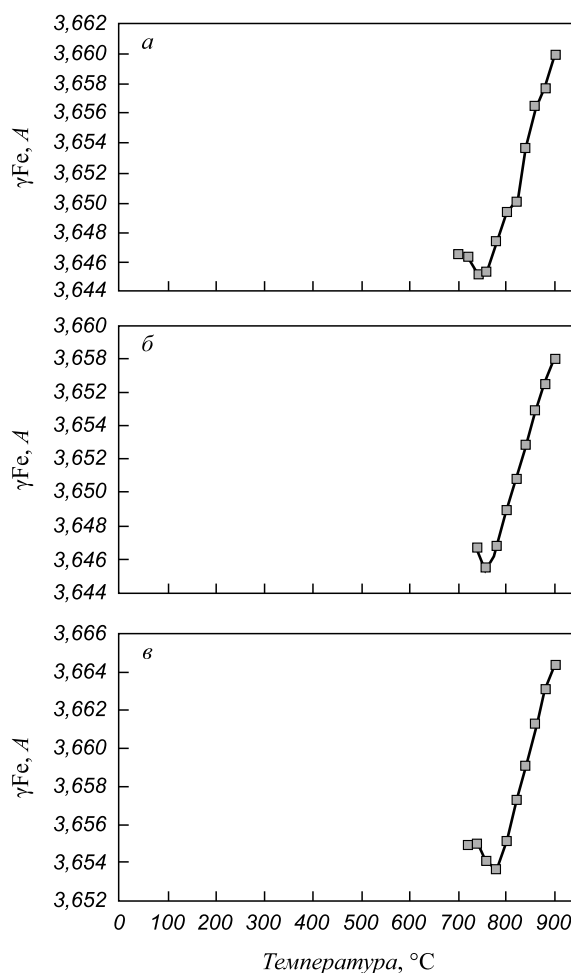


Рис. 4. Изменение параметра кристаллической решетки аустенита при нагревании для анализируемых сталей:  
а – 35ХН1М2ФА; б – 35ХН1М2ФСА; в – 35ХН1М2ФЮА

Fig. 4. Lattice constant behavior of austenite under heating for the analyzed steels:  
а – 35KhN1M2FA; б – 35KhN1M2FSA; в – 35KhN1M2FYuA

2. Беликов С.В., Сергеева К.И., Корниенко О.Ю. и др. Особенности формирования структуры и свойств сталей с гетерогенной бейнито-мартенситной структурой для газонефтепроводов // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2010. № 12. С. 9 – 14.
3. Хотинков В.А., Ощук С.В., Фарбер В.М. Структура и механические свойства среднеуглеродистых сталей после нагрева в межкритический интервал // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2011. № 11. С. 31 – 35.
4. Кудряшова О.В., Гervas'ev M.A., Худорожкова Ю.В. Структура и свойства среднеуглеродистой Cr–Ni–Mo стали с добавлением Si и Al после закалки из двухфазной области // *Фундаментальные исследования*. 2013. № 4 – 3. С. 580 – 585.
5. Nouri A., Saghaian H., Kheirandish Sh. Effects of Silicon Content and Intercritical Annealing on Manganese Partitioning in Dual Phase Steels // *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2010. Vol. 17. Issue 5. P. 44 – 50.
6. Bhadeshia H.K.D.H., Edmonds D.V. Bainite in silicon steels: new composition-property approach. Part 1 // *Metal Science*. 1983. No. 17. P. 420 – 425.
7. Гervas'ev M.A., Маслова О.В., Илларионова С.М. и др. Кинетика бейнитного превращения в Cr–Ni–Mo сталях с добавлением алюминия и кремния // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2014. № 7. С. 57 – 60.

Поступила 9 июля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 9, pp. 677–681.

## EFFECT OF Al AND Si ON THE FORMATION OF AUSTENITE IN INTERCRITICAL TEMPERATURE RANGE IN Cr–Ni–Mo-STEEL

**Gervas'ev M.A.**, Dr. Sci.(Eng.), Professor, Head of the Chair of Metal Science

**Yurovskikh A.S.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Physics and Heat Treatment of Metals  
(artem.yurovskikh@mail.ru)

**Belikov S.V.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Physics and Heat Treatment of Metals

**Maslova O.V.**, Senior Lecturer of the Chair of Metal Science

**Zhilin A.S.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Metal Science (zh-al@yandex.ru)

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

**Abstract.** Aluminum and silicon alloying of Cr–Ni–Mo steel has been investigated. The described steel is used in energetic and heavy machine building engineering. The main aim of the present work was to improve mechanical properties of the steel such as plasticity and impact strength. The high temperature X-ray analysis is applied for understanding the ratio of  $\alpha$ - &  $\gamma$ -phases in various temperature ranges. The critical points were determined and it was shown that the aluminum addition expands the critical temperature region while the silicon addition only moves this region to the higher temperatures. The crystal lattice parameter of austenite is the smallest at 740 °C. Silicon addition makes this temperature higher up to 760 °C. The influence of aluminum is more intensive, the temperature is 780 °C.

**Keywords:** austenite, Cr–Ni–Mo steel, alloying, aluminum, silicon.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-677-681

## REFERENCES

1. Gervas'ev M.A., Kut'in A.B. *Khladoistoikie stali dlya krupnykh pokovok i otlivok* [Cold-resistant steel for large forgings and castings]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2010. 219 p. (In Russ.).
2. Belikov S.V., Sergeeva K.I., Kornienko O.Yu., Ashikhmina I.N., Stepanov A.I. Special features of formation of structure and properties of steels with heterogeneous bainite-martensite structure for gas and oil pipelines. *Metal Science and Heat Treatment*, 2011, vol. 52, no. 11–12, pp. 581–587.
3. Khotinov V.A., Oshchukov S.V., Farber V.M. Structure and mechanical properties of medium-carbon steels after heating in the intercritical temperature range. *Metal Science and Heat Treatment*, 2012, vol. 53, no. 11–12, pp. 545–549.
4. Kudryashova O.V., Gervas'ev M.A., Khudorozhkova Yu.V. The structure and properties of medium Cr–Ni–Mo-steel with the addition of Si and Al after hardening of two-phase area. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2013, no. 4–3, pp. 580–585. (In Russ.).
5. Nouri A., Saghaian H., Kheirandish Sh. Effects of Silicon Content and Intercritical Annealing on Manganese Partitioning in Dual Phase Steels. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2010, Vol. 17, Issue 5, pp. 44–50.
6. Bhadeshia H.K.D.H., Edmonds D.V. Bainite in silicon steels: new composition-property approach Part 1. *Metal Science*. 1983, no. 17, pp. 420–425.
7. Gervas'ev M.A., Maslova O.V., Illarionova S.M., Romanova K.A., Zhilin A.S. Kinetics of bainite transformation of Cr–Ni–Mo steel with aluminum and silicon alloying. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 7, pp. 57–60. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The authors are grateful to the students Akepisheva T. and Filippov V. for the active participation in the work.

Received July 9, 2015

УДК 621.78.084

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ НА МИКРОСТРУКТУРУ РЕЛЬСОВОЙ НАКЛАДКИ

**Захарченко М.В.<sup>1</sup>**, аспирант кафедры «Теплофизика и информатика  
в металлургии» (vniimt1@yandex.ru)

**Жиялков А.Ю.<sup>1</sup>**, ведущий инженер кафедры «Термообработка и физика металлов»

**Липунов Ю.И.<sup>2</sup>**, к.т.н., директор центра новых систем охлаждения и термоупрочнения металла

**Эйсмонт К.Ю.<sup>2</sup>**, к.т.н., заместитель директора центра новых систем  
охлаждения и термоупрочнения металла

**Ярошенко Ю.Г.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина  
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

<sup>2</sup> ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники»  
(620137, Россия, Екатеринбург, ул. Студенческая, 16)

**Аннотация.** Рельсовая накладка представляет собой изделие несимметричного профиля с элементами разной массы – шейка, верхняя и нижняя головки. Нормативные документы предъявляют строгие требования к механическим свойствам и прямолинейности готовых накладок. С использованием оптического и растрового электронного микроскопов исследована микроструктура накладки после прокатки (без термообработки), после термоупрочнения по традиционной технологии – закалке в баке с маслом, а также полученной по технологии ускоренного водяного охлаждения, впервые реализованной для такого рода изделий. В результате установлено, что высокая степень дисперсности фаз и малый размер зерна наилучшим образом обеспечивают получение стабильных механических свойств, что характерно для технологии ускоренного водяного охлаждения. Прямолинейность готовых изделий в данном случае достигается благодаря управляемости процессом охлаждения.

**Ключевые слова:** термоупрочнение, устройство водяного ускоренного охлаждения, закалка, рельсовая накладка, микроструктура, спрейерные установки, термическое упрочнение проката.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-682-687

Рельсовая накладка представляет собой изделие несимметричного профиля с элементами разной массы – шейка, верхняя и нижняя головки. Это изделие устанавливается как на соединении рельсов встык, так и на бесстыковом пути, в том числе для ремонта

рельсового полотна [1]. На рис. 1, а приведено стандартное соединение рельсов встык. Плотное прилегание накладки к элементам головки и подошвы рельса (рис. 1, б) обеспечивает надежную фиксацию стыка, по этой причине прямолинейность готовых

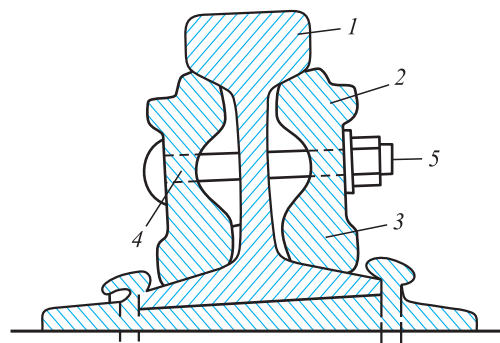


Рис. 1. Стандартный рельсовый стык с накладками Р65:

а – общий вид; б – вид в разрезе; 1 – головка рельса; 2 – верхняя головка рельсовой накладки; 3 – нижняя головка рельсовой накладки; 4 – шейка накладки; 5 – стыковой болт

Fig. 1. The standard rail splice with R65 joint bar connections:

а – general view; б – cross-section view; 1 – rail head; 2 – the joint bar's upper bulbous head; 3 – the joint bar's lower bulbous head; 4 – the joint bar's web; 5 – fishplate bolt

накладок – одно из строгих требований нормативных документов [2].

Для обеспечения требуемых механических свойств накладки подвергают обязательной термообработке либо в баке с маслом [2], либо струями воды\* [3, 4], что приводит к изменению микроструктуры и механических характеристик. Действующая нормативная документация [2] не устанавливает требований к микроструктуре накладок. Между тем хорошо известно, что механические свойства изделия определяются получающейся в процессе термоупрочнения микроструктурой. Однако в литературе отсутствуют данные о влиянии режима термообработки накладок на их микроструктуру.

По традиционной технологии объемной закалки в масле накладки после пресса горячей прошивки с температурой около 810 °С поступают на конвейер подачи в масляный бак, температура в котором поддерживается в пределах 60 – 70 °С. В масле накладка охлаждается в течение около 5 мин, затем поступает в моечный бак, далее в правильный пресс для обеспечения прямолинейности и укладывается на стеллаж готовой продукции. Процесс охлаждения профиля накладки был воспроизведен с помощью математической модели [4]. На рис. 2 приведены результаты расчета по охлаждению различных точек накладки во времени. Из анализа этих данных следует, что середины верхней и нижней головок, а также шейка накладки охлаждаются с различными скоростями вследствие разной термиче-

ской массивности: шейка остывает быстрее, а головки являются источниками тепла, разогревая ее. Существующий способ объемной закалки накладок в масляной ванне не учитывает различий в термической массивности ее элементов, по этой причине неизбежно проводят операцию правки накладок в прессе.

Микроструктура накладок до и после объемной закалки в масле исследована с помощью оптического микроскопа (рис. 3). Она представлена пластинчатым перлитом и ферритом, ориентированным по границам зерен, балл зерна равен 4 – 5 [5], что эквивалентно 88 – 62 мкм.

Микроструктура объемно-закаленных в масле накладок, полученная с применением растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6490LV в режиме вторичных электронов, приведена на рис. 4. Условия закалки при этом были следующими: объем бака  $V_m$  составлял 3 м<sup>3</sup>, температура масла в нем – в среднем 20 °С. Температура накладки после прокатки, при которой накладка поступала на термообработку, находилась в пределах  $t_{нагр} = 810 – 820$  °С. Полученная структура представляет собой пластинчатый перлит с ферритом по границе зерна. Она отличается от представленной на рис. 3 неравномерной величиной зерен – от 40 до 70 мкм [5] и более плотной перлитной структурой.

По технологии ускоренного водяного охлаждения накладка, нагретая до температуры около 850 – 870 °С, последовательно проходила завесу из плоских водяных факелов, установленных с четырех сторон и покрываю-

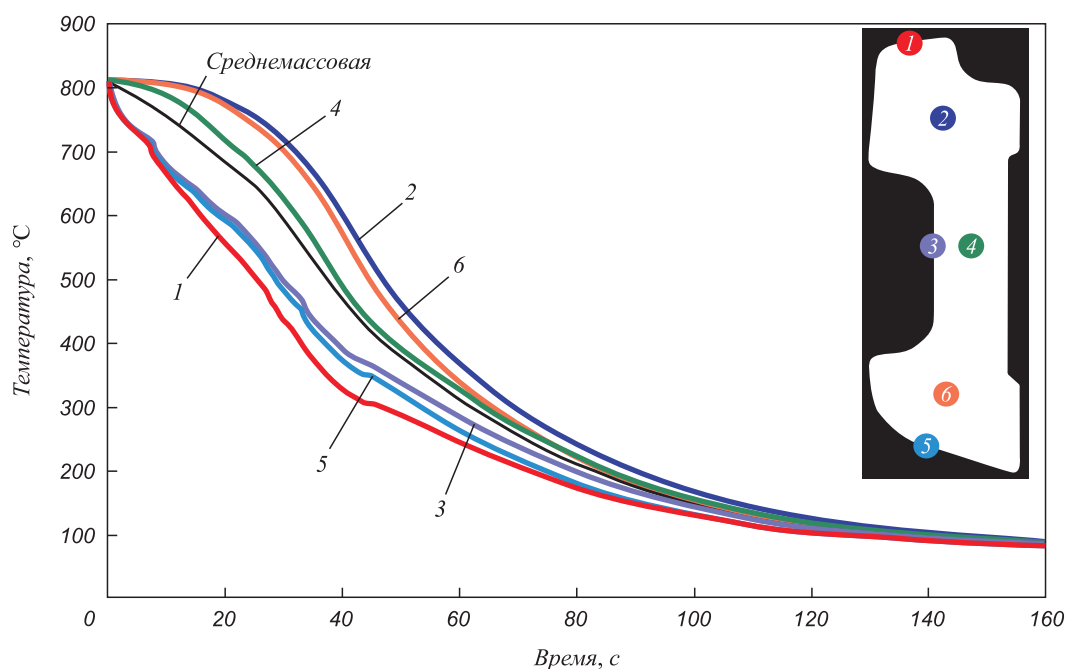


Рис. 2. Расчетное изменение температуры в точках накладки во времени при охлаждении в масле (номер кривой соответствует номеру расчетной точки)

Fig. 2. Numerical changes of the temperature at fishplate points during the oil quenching process (the curve number is in accordance with the numerical number)

\* В работе принимали участие Э.В. Абрамов, Т.П. Пургина, Е.В. Некрасова

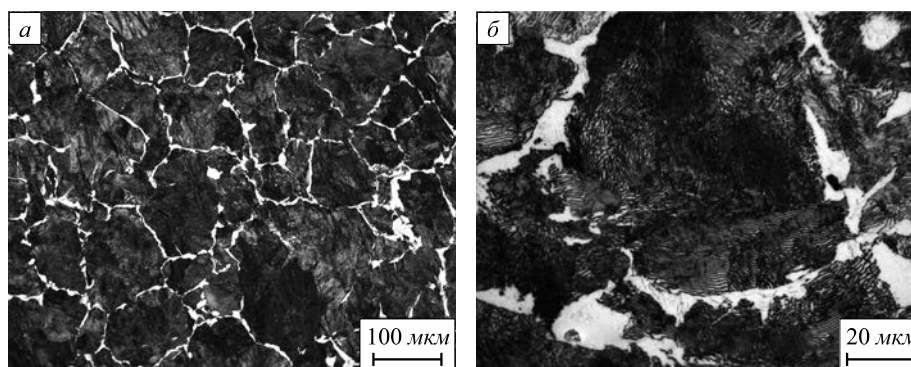


Рис. 3. Микроструктура рельсовой накладки 0,53 % С после горячей прокатки:  
а –  $\times 200$ ; б –  $\times 1000$

Fig. 3. The microstructure of the joint bar 0.53 % C before thermohardening  
а –  $\times 200$ ; б –  $\times 1000$

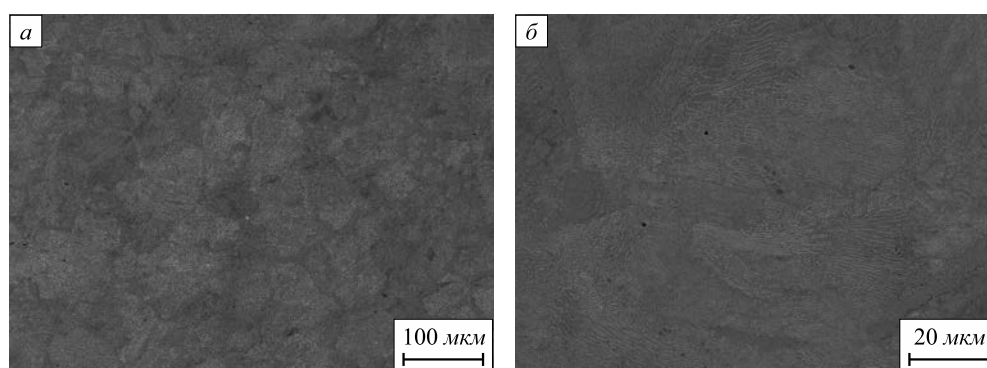


Рис. 4. Микроструктура верхней головки образца 0,57 % С после охлаждения в объеме масла:  
а –  $\times 200$ ; б –  $\times 1000$

Fig. 4. The microstructure of the joint bar' upper bulbous head 0.57 % C after oil quenching:  
а –  $\times 200$ ; б –  $\times 1000$

щих всю ее поверхность [3]. Существенным преимуществом такой технологии является возможность регулирования скорости охлаждения изменением плотности орошения ( $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ) верхней, нижней и боковых поверхностей накладки. Это преимущество позволяет получать структуру металла, которая способна обеспечить стабильные значения механических свойств накладок, что недостижимо при объемной закалке изделий [4]. На рис. 5 приведено расчетное изменение температуры накладки по сечению при охлаждении в двух секциях устройства с учетом фактического времени ее охлаждения и плотностей орошения в устройстве. На рис. 5 также представлены средние значения температуры верхней головки, шейки и нижней головки, измеренные пирометром после выхода накладки из промышленного устройства.

Микроструктура рельсовой накладки после термоупрочнения в экспериментальном устройстве по режиму, представленному на рис. 5, отражена на рис. 6. Середина верхней головки состоит из пластинчатого перлита и феррита по границе зерен, размер которых около 10 – 15 мкм, а приповерхностный слой представ-

ляет собой дисперсный сорбит отпуска. На рис. 7 показаны структуры накладки после охлаждения в промышленном устройстве. По рис. 7, б можно оценить размер зерна в 30 мкм, при этом структурные составляющие идентичны тем, которые представлены на рис. 6.

Таким образом, технология ускоренного водяного охлаждения рельсовых накладок обеспечивает более высокую степень дисперсности структуры и меньший размер зерна в сравнении с технологией объемной закалки в масле.

Гибкая с точки зрения управляемости технология ускоренного водяного охлаждения рельсовых накладок внедрена на Нижнесалдинском металлургическом заводе (НСМЗ). В процессе пуско-наладочных работ были установлены режимы работы устройства, на которых в зависимости от химического состава стали обеспечиваются требуемые механические свойства. В таблице представлены сведения о механических свойствах накладок различных плавок, термоупрочненных в промышленном устройстве ускоренного охлаждения, и требования технических условий ТУ 14-2Р-463-2011 [6], специально разработанных на основе ГОСТ 4133-73 [2].

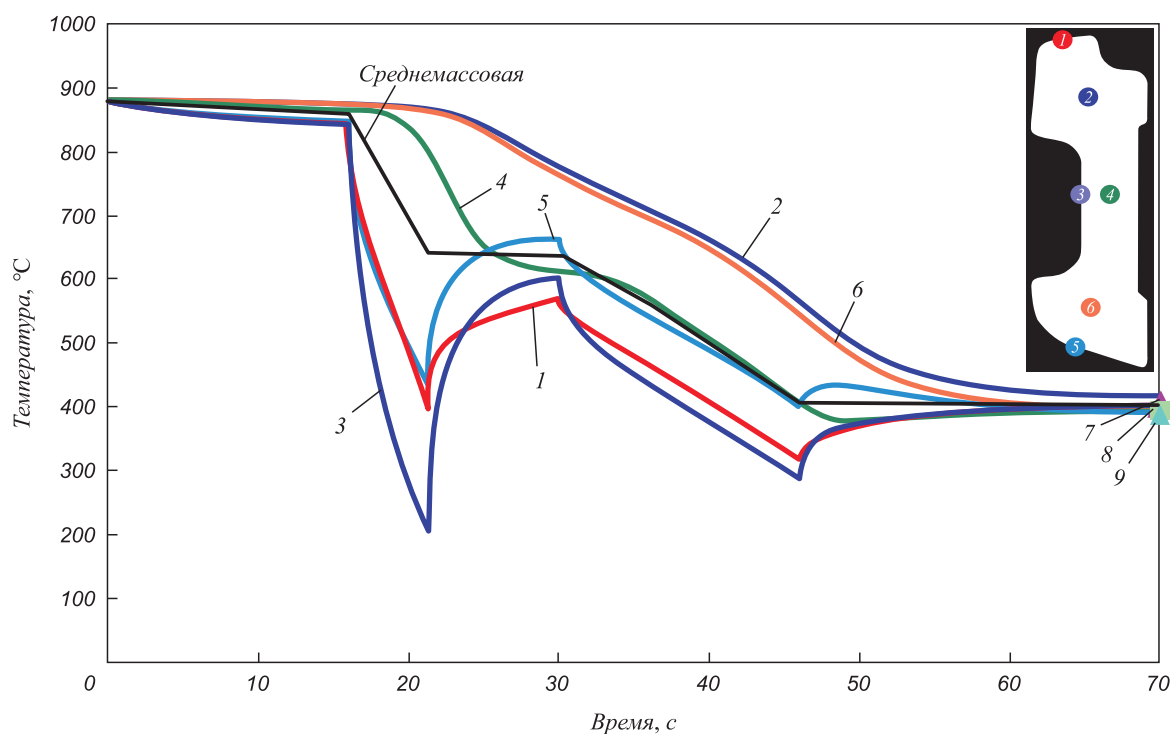


Рис. 5. Расчетное изменение температуры различных точек рельсовой накладки во времени при охлаждении водой: 1 – 6 – номер кривой, соответствующий номеру расчетной точки; 7 – 9 – среднее значение температуры верхней головки, шейки и нижней головки соответственно

Fig. 5. Numerical changes of the temperature at fishplate numerical points during the process of accelerated water cooling: 1 – 6 – curve number in accordance with numerical point; 7 – 9 – the average temperature of the joint bar' upper bulbous head, web, lower bulbous head accordingly

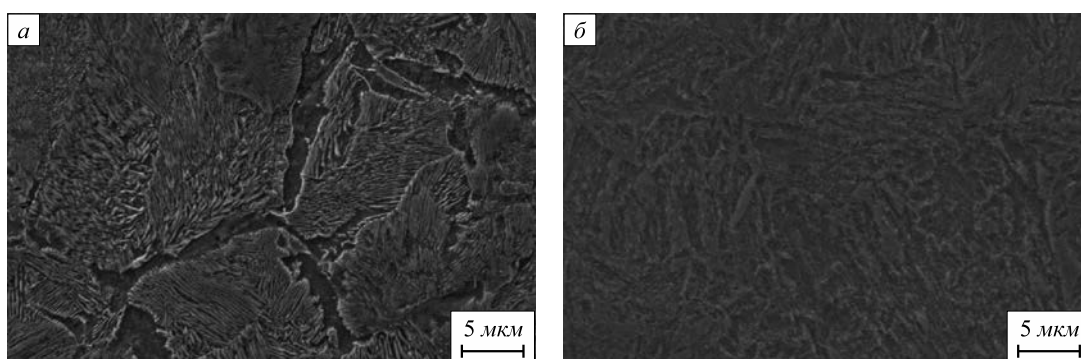


Рис. 6. Микроструктура после термоупрочнения по технологии ускоренного водяного охлаждения в экспериментальном устройстве ВНИИМТ:  
а – середина верхней головки рельсовой накладки; б – на расстоянии 500 мкм от кромки верхней головки рельсовой накладки. Содержание углерода 0,53 %,  $\times 3000$

Fig. 6. The microstructure of the joint bar' upper bulbous head after accelerated water cooling process at experimental unit of OJSC "VNIIMT":  
а – the middle part of upper bulbous head; б – at a distance of 500  $\mu\text{m}$  from the upper edge of the head. Carbon content – 0.53 %,  $\times 3000$

При закалке в масле не удастся получить стабильных механических свойств. В работе [7] показано, что для накладок, закаленных в масле, разброс значений относительного сужения при одинаковых значениях предела прочности довольно широк – от 14 – 28 % до 30 – 48 %.

**Выводы.** С использованием оптического и растрового электронного микроскопов исследована микро-

структура накладки после прокатки при охлаждении на воздухе (без термообработки), после закалки в баке с маслом, а также полученной по технологии водяного ускоренного охлаждения. Вид структуры при струйном водяном охлаждении принципиально не отличается от структуры, полученной после закалки в масле, и представляет собой перлит с ферритной сеткой по границе. Основное отличие состоит в степени дисперсности фаз

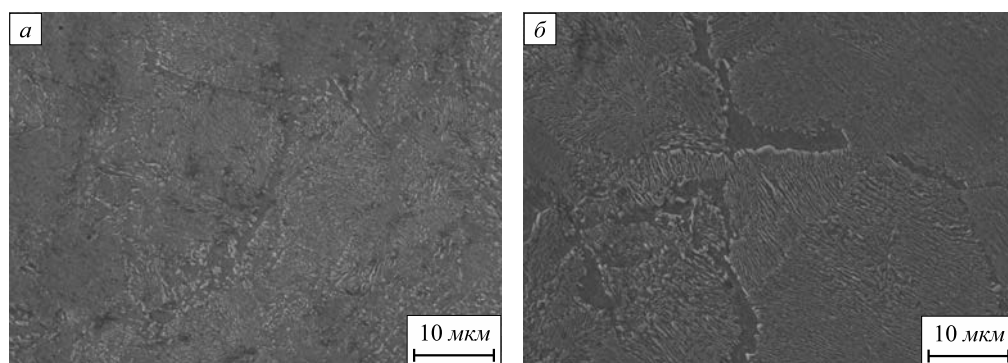


Рис. 7. Микроструктура образцов верхней головки накладки после охлаждения в промышленном устройстве закалки рельсовых накладок HCM3:

*a* – на расстоянии 500 мкм от края; *б* – середина верхней головки. Содержание углерода 0,57 %

Fig. 7. The microstructure of the joint bar's upper bulbous head after accelerated water cooling process at Niznesaldinskii metallurgical plant: *a* – at a distance of 500 μm from the upper edge of the head; *б* – the middle part of upper bulbous head. Carbon content – 0.57 %

Таблица 1

**Механические свойства термоупрочненных накладок по технологии ускоренного охлаждения на Нижнесалдинском металлургическом заводе**

**Table 1. Mechanical properties of R65 type thermostrengthened joint bar in accelerated cooling device at Niznesaldinskii metallurgical plant**

| Металл производства                                          | $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup> | $\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup> | $\delta_5$ , % | $\psi$ , % | HB        |
|--------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------|------------|-----------|
| Нижнетагильский металлургический комбинат, C = 0,485 %       | 855 – 923                      | 570 – 620                      | 12 – 16        | 31 – 44    | 241 – 269 |
| Новокузнецкий металлургический комбинат, C = 0,560 – 0,570 % | 850 – 912                      | 530 – 555                      | 13 – 19        | 31 – 41    | 241 – 321 |
| Требования ТУ 14-2Р-463-2011, не менее                       | 844                            | 530                            | 10             | 30         | 235 – 388 |

и размере зерен, что и обуславливает получение стабильных механических свойств на различных режимах работы устройства.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Иванов П.С., Даньков С.Ф., Юзык О.В., Шишмаев А.А. Новые ресурсосберегающие технологии в рельсовом хозяйстве // Путь и путевое хозяйство. 2011. № 7. С. 23 – 25.
2. ГОСТ 4133-73. Накладки рельсовые двухголовые для железных дорог широкой колеи. Технические требования. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. – 7 с.
3. Yaroshenko Y.G., Lipunov Y.I., M.V. Startseva M.V. et al. Developing a modern thermal strengthening technique for regulated fishp-

- late cooling // Energy Production and Management in the 21st Century. The Quest for Sustainable Energy. 2014. Vol. 1. P. 491 – 501.
4. Захарченко М.В. Разработка и внедрение устройства и технологии ускоренного охлаждения для обеспечения механических свойств металла рельсовых накладок: Дис. ...канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2014. – 136 с.
5. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 38 с.
6. ТУ 14-2Р-463-2011. Производство накладок двухголовых для железнодорожных рельсов типов Р50 и Р65. 2011. – 10 с.
7. Отработка технологии термоупрочнения рельсовых накладок на опытном стенде ОАО «ВНИИМТ»: Отчет о НИР. – Екатеринбург: ОАО «ВНИИМТ», 2012. С. 45 – 47.

Поступила 10 апреля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 9, pp. 682–687.

**INFLUENCE OF THE QUENCHING TECHNOLOGIES ON THE JOINT BAR MICROSTRUCTURE**

**Zakharchenko M.V.<sup>1</sup>**, Postgraduate of the Chair “Metal Science and Heat Treatment” (vniimt1@yandex.ru)

**Zhilyakov A.Yu.<sup>1</sup>**, Senior Engineer of the Chair of Physics and Heat Treatment of Metals

**Lipunov Yu.I.<sup>2</sup>**, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Center of Modern Cooling Systems and Thermohardening Metals Technologies

**Eismond K.Yu.<sup>2</sup>**, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director of the Center of Modern Cooling Systems and Thermohardening Metals Technologies

**Yaroshenko Yu.G.<sup>1</sup>**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metal Science and Heat Treatment”

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

<sup>2</sup> OJSC Research Institute of Metallurgical Heat Engineering (VNIIMT) (16, Studencheskaya str., Ekaterinburg, 620137, Russia)

**Abstract.** Joint bar (fishplate) is an asymmetrical cross-section product with different mass elements – the web, the upper and lower bulbous heads. Technical standards specify the strict requirements on the joint bar mechanical properties and straightness. The microstructure after rolling (without heat treatment), after thermostrengthening according to the traditional technology – oil quenching, and accelerated water cooling technology has been studied by using optical and scanning electron microscope. The accelerated water cooling technology was the first implemented in industry for asymmetrical cross-section body. As a result, it was found that a high degree dispersion of the phases and the small grain size provided the best results in stable mechanical properties, which is typical for the sprayer system. The joint bar straightness is achieved in response to the cooling process controllability.

**Keywords:** thermostrengthening, accelerated water cooling device, quenching, joint bar (fishplate), sprayer system, rolled metal thermo strengthening, microstructure.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-682-687

## REFERENCES

1. Ivanov P.S., Dan'kov S.F., Yuzyk O.V., Shishmaev A.A. New resource-saving technologies in the rail sector. *Put' i putevoe khozyaistvo*. 2011, no. 7, pp. 23–25. (In Russ.).
2. GOST 4133-73. *Nakladki rel'sovye dvukhgolovye dlya zheleznykh dorog shirokoi kolei. Tekhnicheskie trebovaniya* [State standard 4133-73. Two-headed rail pads for broad gauge railways. Technical requirements]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 1998. 7 p. (In Russ.).
3. Yaroshenko Y.G., Lipunov Y.I., Startseva M.V. etc. Developing a modern thermal strengthening technique for regulated fishplate cooling. *Energy Production and Management in the 21st Century. The Quest for Sustainable Energy*. 2014. Vol. 1, pp. 491–501.
4. Zakharchenko M.V. *Razrabotka i vnedrenie ustroystva i tekhnologii uskorenogo okhlazhdeniya dlya obespecheniya mekhanicheskikh svoystv metalla rel'sovykh nakladok*: dis. ...kand. tekhn. nauk [Development and implementation of equipment and technology of rapid cooling to ensure the mechanical properties of the metal of rail lining. Cand. Tech. Sci. Diss.]. Ekaterinburg, 2014. 136 p. (In Russ.).
5. GOST 5639-82. *Stali i splavy. Metody vyyavleniya i opredeleniya velichiny zerna* [State standard 5639-82. Metals and alloys. Methods for detection and determination of the grain size]. Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 2003. 38 p. (In Russ.).
6. TU 14-2R-463-2011. *Proizvodstvo nakladok dvukhgolovykh dlya zheleznodorozhnykh rel'sov tipov R50 i R65* [Production of linings for the two-headed rails of R50 and R65 types]. 2011. 10 p. (In Russ.).
7. *Otrabotka tekhnologii termouprochneniya rel'sovykh nakladok na opytnom stende OAO «VNIIMT»: otchet o NIR* [Testing technology thermostrengthening of rail pads on the test stand of OJSC "VNIIMT": report on research]. Ekaterinburg : OAO "VNIIMT", 2012, pp. 45–47. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was performed with the participation of Abramov E.V., Purgina T.P., Nekrasov E.V.

Received April 10, 2015

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОПИСАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛОТНОГО СЛОЯ ИЗ ЧАСТИЦ РАЗНОЙ ФОРМЫ

**Юрьев Б.П.**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

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

**Луговкин В.В.**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

**Ярчук В.Ф.**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

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

**Аннотация.** Приведены результаты анализа расчетных выражений, полученных разными исследователями, для определения величины гидравлического сопротивления плотного слоя, состоящего из различного вида частиц (шаровидные частицы, окатыши, частицы произвольной формы). В качестве критерия для выявления общих закономерностей зависимости гидравлического сопротивления слоя от температуры и скорости фильтрации был использован приведенный коэффициент гидравлического сопротивления. Показано, что на характер зависимости гидравлического сопротивления слоя от порозности практически не влияет форма частиц. Рекомендована формула, с помощью которой достаточно надежно можно рассчитывать коэффициент гидравлического сопротивления слоя окатышей при их естественной засыпке и отсутствии значительного количества мелочи, а, следовательно, определять потери энергии в самом слое и в целом по всему газозвудному тракту обжиговых установок.

**Ключевые слова:** слой, частицы, окатыши, анализ, гидравлическое сопротивление, порозность, скорость фильтрации, потери энергии.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-688-695

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа расчетных выражений, используемых для определения гидравлического сопротивления слоя, состоящего из частиц разной формы, а также железорудных окатышей, и обоснование и выбор формулы, которая бы позволяла надежно рассчитывать эту величину, а также коэффициента гидравлического сопротивления, без которого невозможно определить близкие к реальным потери давления в слое.

Наиболее активно работы по определению гидравлического сопротивления плотного слоя, в том числе слоя из железорудных окатышей, проводились в 60 – 80 годы прошлого столетия [1 – 6]. В последнее время этим вопросам уделяется мало внимания.

Обычно выражения, предлагаемые различными авторами для расчета гидравлического сопротивления слоя  $\Delta p$ , Па, могут быть записаны либо в виде известной формулы Дарси-Вейсбаха

$$\Delta p = \zeta_{\text{сл}} \frac{\rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2}{2} \frac{H}{d}, \quad (1)$$

либо в виде [1]

$$\Delta p = C_{\text{сл}} \rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2 H, \quad (2)$$

где  $\zeta_{\text{сл}}$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $\rho_{\text{г}}$  – плотность фильтрующей среды, кг/м<sup>3</sup>;  $w_{\text{г}}$  – ско-

рость фильтрации, м/с;  $H$  – высота слоя, м;  $d$  – размер частиц слоя, м;  $C_{\text{сл}}$  – приведенный коэффициент гидравлического сопротивления, м<sup>-1</sup>.

Введение приведенного коэффициента гидравлического сопротивления  $C_{\text{сл}}$  можно оправдать тем, что коэффициент гидравлического сопротивления  $\zeta_{\text{сл}}$  сам зависит от размера частиц  $d$ , хотя из формулы (1) этого не видно. В остальном введение коэффициента  $C_{\text{сл}}$  ничего нового не вносит, так как имеется простая зависимость

$$C_{\text{сл}} = \frac{\zeta_{\text{сл}}}{2d}. \quad (3)$$

Обрабатывая данные лабораторных исследований, одни авторы [1] считают коэффициент  $C_{\text{сл}}$  функцией только критерия Рейнольдса  $Re_{\text{сл}} = wd/v$ , не усматривая зависимости  $\zeta_{\text{сл}}$  от порозности (или не усматривая зависимости последней от размера частиц  $d$ ). Другие авторы находят, что порозность слоя  $m$  значительно зависит от  $d$ , и потому  $\zeta_{\text{сл}}$  является функцией  $Re_{\text{сл}}$  и  $m$ . Третьи авторы [4] отмечают зависимость  $m$  от  $d$ . Авторы работ [2, 7] считают, что при расчете гидравлического сопротивления слоя из любых частиц достаточно учитывать зависимость  $C_{\text{сл}}$  (и, следовательно,  $\zeta_{\text{сл}}$ ) только от размера частиц  $d$ , а зависимостью  $C_{\text{сл}}$  от скорости фильтрации, температуры, формы частиц, порозности (при естественной засыпке) можно пренебречь.

Поскольку окатыши имеют шаровидную форму, то представляется очевидным, что их гидравлическое сопротивление должно быть несколько выше, чем слоя шаров, и значительно ниже, чем слоя частиц неправильной формы. Более неопределенным является вопрос о том, как зависит гидравлическое сопротивление слоя окатышей (при естественной засыпке) от порозности и

как зависит порозность от размера окатышей. С целью получения сравнимых данных были выполнены расчеты приведенного коэффициента  $C_{\text{сл}}$  по данным ряда работ для различных видов частиц (шаровидные частицы, окатыши, частицы произвольной формы) (табл. 1). Порозность для всех расчетных выражений принята в соответствии с выражением

Таблица 1

**Расчетные выражения для определения величины гидравлического сопротивления слоя по данным ряда авторов**

Table 1. Calculated expressions for definition of hydraulic resistance of the layer according to some authors

| Номер формулы | Вид частиц                | $\Delta p$ , Па                                                                              | $\zeta_{\text{сл}}$                                                                                                                                                                                                                                                                                   | $C_{\text{сл}}$ , $\text{м}^{-1}$                                            | Источник |
|---------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 1             | Шаровидные                | $\Delta p = \zeta_{\text{сл}} \frac{\rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2 H}{2 d}$                  | $\zeta_{\text{сл}} = \frac{1,53}{m^{4,2}} \left( 0,3 + \frac{3}{\text{Re}_{\text{стр}}^{0,7}} + \frac{30}{\text{Re}_{\text{стр}}} \right)$<br>$\text{Re}_{\text{стр}} = \frac{0,45}{(1-m)\sqrt{m}} \text{Re}_{\text{сл}}$                                                                             | $C_{\text{сл}} = \frac{\zeta_{\text{сл}}}{2d}$                               | [8]      |
| 2             | Куски произвольной формы  | $\Delta p = \zeta_{\text{сл}} \frac{\rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2 H}{2 d}$                  | $\zeta_{\text{сл}} = \frac{1,53}{m^{4,2}} \left( 1 + \frac{15}{\text{Re}_{\text{стр}}^{0,5}} + \frac{75}{\text{Re}_{\text{стр}}} \right)$<br>$\text{Re}_{\text{стр}} = \frac{0,45}{(1-m)\sqrt{m}} \text{Re}_{\text{сл}}$                                                                              | $C_{\text{сл}} = \frac{\zeta_{\text{сл}}}{2d}$                               | [8]      |
| 3             | Окатыши (восстановленные) | $\Delta p = \lambda \frac{\rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2}{2} \frac{6(1-m)}{m^3} \frac{H}{d}$ | $\lambda = \frac{3,9m^3}{1-m}, \text{Re}_{\text{к}} > \text{Re}_{\text{кр}}$<br>$\lambda = \frac{17,35m^{2,5}}{(1-m)^5 \text{Re}_{\text{к}}}, \text{Re}_{\text{к}} \leq \text{Re}_{\text{кр}}$<br>$\text{Re}_{\text{к}} = \frac{0,667}{1-m} \text{Re}_{\text{сл}}, \text{Re}_{\text{кр}} = 294\,000d$ | $C_{\text{сл}} = \frac{3\lambda}{d} \frac{1-m}{m^3}$<br>$m = 0,222d^{0,252}$ | –        |
| 4             | Шаровидные                | $\Delta p = \xi \frac{\rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2}{2} \frac{6(1-m)}{m^3} \frac{H}{d}$     | $\xi = \frac{2,22}{\text{Re}_{\text{к}}^{0,2}}$<br>$\text{Re}_{\text{к}} = 45 - 4000$<br>$\text{Re}_{\text{к}} = \frac{0,667}{1-m} \text{Re}_{\text{сл}}$                                                                                                                                             | $C_{\text{сл}} = \frac{3\xi}{d} \frac{1-m}{m^3}$                             | [9]      |
| 5             | Куски произвольной формы  | $\Delta p = \xi \frac{\rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2}{2} \frac{77(1-m)}{m^3} \frac{H}{d}$    | $\xi = \frac{211}{\text{Re}_{\text{к}}} + 0,85$<br>$\text{Re}_{\text{к}} = \frac{0,519}{1-m} \text{Re}_{\text{сл}}$<br>$\text{Re}_{\text{к}} = 50 - 800$                                                                                                                                              | $C_{\text{сл}} = \frac{3,85}{d} \frac{\xi(1-m)}{m^3}$                        | [10]     |
| 6             | Куски произвольной формы  | $\Delta p = C_{\text{сл}} \rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2 H$                                  | –                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | $C_{\text{сл}} = \frac{0,15}{d^2} + 200$                                     | [7]      |
| 7             | Окатыши                   | $\Delta p = C_{\text{сл}} \rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2 H$                                  | –                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | $C_{\text{сл}} = 141 \exp\left(\frac{0,021}{d}\right)$                       | [2]      |
| 8             | Окатыши                   | $\Delta p = \zeta_{\text{сл}} \frac{\rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2 H}{2 d}$                  | $\xi_{\text{сл}} = \frac{100}{\text{Re}_{\text{сл}}^{0,214}}$<br>$\text{Re}_{\text{сл}} = \frac{w_{\text{г}} d}{\nu}$                                                                                                                                                                                 | $C_{\text{сл}} = \frac{\zeta_{\text{сл}}}{2d}$                               | [1]      |
| 9             | Окатыши                   | $\Delta p = \zeta_{\text{сл}} \frac{\rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2 H}{2 d}$                  | $\xi_{\text{сл}} = \frac{3300}{\text{Re}_{\text{сл}}} + 16$<br>$200 \leq \text{Re}_{\text{сл}} \leq 2000$                                                                                                                                                                                             | $C_{\text{сл}} = \frac{\zeta_{\text{сл}}}{2d}$                               | [11]     |

$$m = 0,222 d^{0,252}. \quad (4)$$

Результаты расчетов зависимости приведенного коэффициента  $C_{\text{сл}}$  от размера частиц показаны на рис. 1 (скорость фильтрации  $w_r = 0,6$  м/с, температура воздуха  $t_r = 0$  °С). Номера кривых на рис. 1 (а также ниже на рис. 3) соответствуют номеру расчетного выражения по табл. 1. Обращает на себя внимание эквидистантность некоторых кривых (1, 2, 4, 5) на рис. 1, несмотря на то, что соответствующие расчетные выражения получены авторами независимо друг от друга и для частиц разной формы (1, 4 – для частиц шаровой формы; 2, 5 – для частиц типа неправильных кусков). Эквидистантности кривых в полулогарифмических координатах соответствует эквипропорциональность соответствующих значений коэффициента  $C_{\text{сл}}$  в обычных координатах. Это хорошо видно из табл. 2, где вычислены отношения  $C_{\text{сл}i}/C_{\text{сл}1}$  при разных размерах частиц слоя  $d$ . Приведенные коэффициенты  $C_{\text{сл}}$ , вычисленные по формулам (1), (2), (4) и (5), эквипропорциональны в диапазоне  $d = 8 - 20$  мм с точностью до  $\pm 3$  %. Это указывает на то, что характер зависимости коэффициента  $C_{\text{сл}}$  от размера слабо зависит от рода частиц. Кроме того, эти кривые получены при условии, что порозность су-

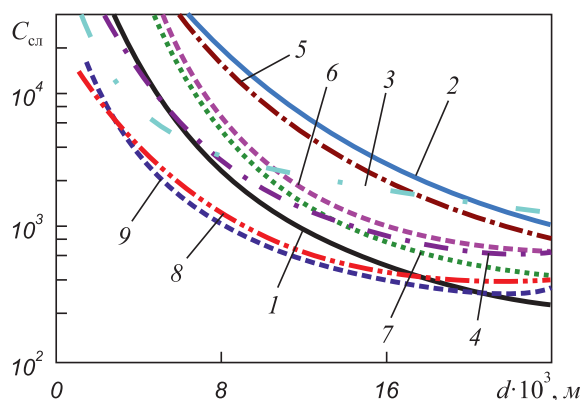


Рис. 1. Зависимость приведенного коэффициента  $C_{\text{сл}}$  от размера частиц; цифры у кривых соответствуют номерам формул в табл. 1

Fig. 1. Dependence of the reduced  $C_{\text{сл}}$  coefficient from the particle size; figures on the curves correspond to the numbers of the formulas in Table 1

щественно меняется с изменением диаметра. Отсюда можно заключить, что зависимость коэффициента  $C_{\text{сл}}$  от порозности примерно одинакова для частиц различной формы.

Кроме указанной группы кривых, на рис. 1 есть еще одна группа примерно эквидистантных кривых в диапазоне  $d = 12 - 24$  мм. Это кривые 3, 7 – 9, которые описывают зависимость  $C_{\text{сл}} = f(d)$  для окатышей. Кривая 6 также может быть отнесена к этой группе, хотя авторы работы [7] отводят ей роль универсальной кривой, пригодной для расчета  $C_{\text{сл}}$  во всех случаях (из рис. 1 видно, что кривые 2, 3, 5 отклоняются от кривой 6 на 200 – 300 %). Из этой группы относительно близких друг к другу ( $d = 8 - 20$  мм) кривых резко выделяется кривая 3, полученная для слоя из восстановленных окатышей.

Результаты расчета коэффициента  $C_{\text{сл}}$  по формуле (3) (см. табл. 1) выше, чем по (7) – (9), в 1,5 – 2,0 раза. Характер зависимости  $C_{\text{сл}}$  от порозности по формуле (3) резко отличается от той, которая определяется всеми другими формулами. Это можно объяснить только спецификой гидравлических свойств слоя из восстановленных окатышей.

К такому же выводу можно прийти, рассматривая на рис. 2 зависимости гидравлического сопротивления слоя окатышей высотой 1 м от скорости фильтрации. Видно, что при диаметре окатышей 11,0 – 11,5 мм кривая 1 (восстановленные окатыши) проходит выше на 50 – 100 % (при  $w_r = 0,5 - 1,0$  м/с), чем кривые по данным других авторов. Из рис. 2 и табл. 3, в которой содержатся пояснения к рис. 2, видно, что данные авторов [1 – 3], полученные на сухих и обожженных окатышах из отечественных [1, 2] и зарубежных [3] концентратов, весьма близки между собой. Резкое расхождение кривой 1 с кривыми 2 – 4 на рис. 2 и еще более резкое расхождение кривой 3 с кривыми 7 – 9 (см. рис. 1) приводит к необходимости исключения результатов, полученных для восстановленных окатышей, из дальнейшего рассмотрения.

Для выявления общих закономерностей зависимости гидравлического сопротивления слоя от температуры  $t_r$  и скорости фильтрации  $w_r$ , были проведены расчеты коэффициента  $C_{\text{сл}}$  по формулам тех же авторов при  $d = 14$  мм,  $w_r = 0,6$  м/с,  $t_r = \text{var}$  (результаты приве-

Таблица 2

### Эквипропорциональность приведенных коэффициентов $C_{\text{сл}}$ для частиц разной формы

Table 2. Equiproportionality of the reduced  $C_{\text{сл}}$  coefficients for particles of different shapes

| Отношение                       | Значения отношений при $d_{\text{ср}}, \text{ мм}$ |      |      |      |      |      |                  |
|---------------------------------|----------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------------------|
|                                 | 8                                                  | 10   | 12   | 14   | 16   | 18   | 20               |
| $C_{\text{сл}4}/C_{\text{сл}1}$ | 1,24                                               | 1,27 | 1,29 | 1,30 | 1,30 | 1,30 | 1,30             |
| $C_{\text{сл}5}/C_{\text{сл}1}$ | 3,55                                               | 3,46 | 3,43 | 3,39 | 3,37 | 3,35 | 3,33             |
| $C_{\text{сл}2}/C_{\text{сл}1}$ | 4,57                                               | 4,52 | 4,47 | 4,42 | 4,39 | 4,35 | 4,31             |
|                                 |                                                    |      |      |      |      |      | Среднее значение |
|                                 |                                                    |      |      |      |      |      | 1,27             |
|                                 |                                                    |      |      |      |      |      | 3,44             |
|                                 |                                                    |      |      |      |      |      | 4,44             |

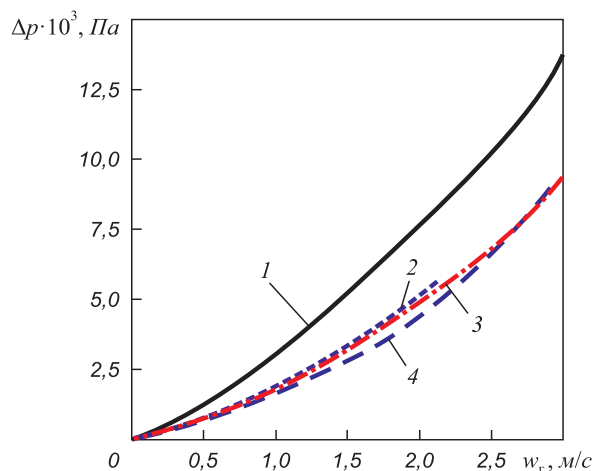


Рис. 2. Зависимость гидравлического сопротивления слоя окатышей высотой 1 м от скорости фильтрации (пояснения в табл. 3): 1 – для восстановленных окатышей; 2 – по данным работы [3]; 3 – по данным работы [1]; 4 – по данным работы [2]

Fig. 2. Dependence of hydraulic resistance layer pellets height of 1 m from the filtration rate (explanation in Table 3): 1 – to recover pellets; 2 – according to [3]; 3 – according to [1]; 4 – according to [2]

дены на рис. 3, а) и при  $d = 14$  мм,  $t_r = 0$  °С,  $w_r = \text{var}$  (результаты приведены на рис. 3, б). Из рис. 3, а видно, что величина  $C_{\text{сл}}$  зависит от  $t_r$  довольно слабо и при изменении  $t_r$  от 0 до 1000 °С возрастает не более, чем на 40 – 60 % (в среднем ~50 %). Авторы работы [7] считают, что при расчете гидравлических сопротивлений слоя зависимость  $C_{\text{сл}}$  от  $t_r$  можно не учитывать (штриховые линии 6, 7 на рис. 3, а). В среднем можно рекомендовать зависимость

$$C_{\text{сл}}(t) = C_{\text{сл}(0)}(1 + 0,5t_r \cdot 10^{-3}), \quad (5)$$

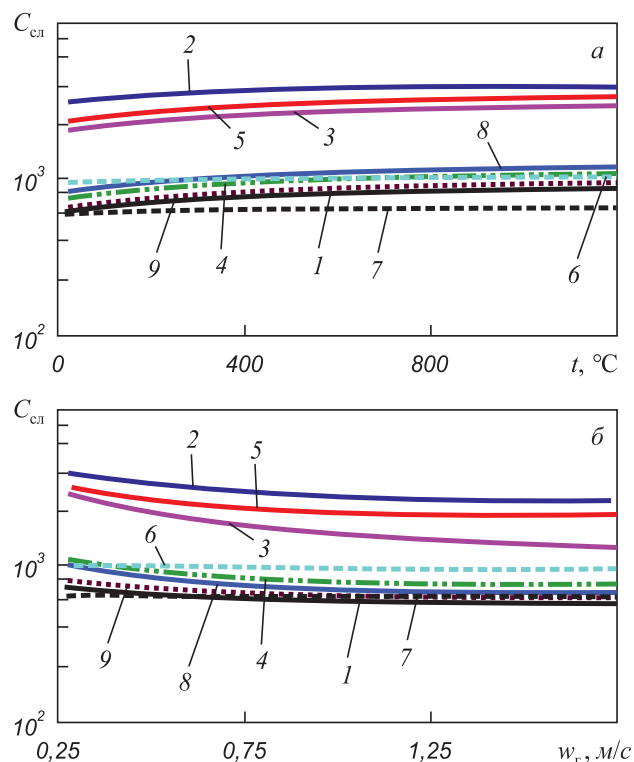


Рис. 3. Зависимости приведенного коэффициента  $C_{\text{сл}}$  от температуры воздуха (а) и скорости фильтрации (б); цифры у кривых соответствуют номерам формул в табл. 1

Fig. 3. Dependence of the  $C_{\text{сл}}$  coefficient from air temperature (a) and filtration rate (b); figures on the curves correspond to the numbers of the formulas in Table 1

где  $C_{\text{сл}(0)}$  – приведенный коэффициент гидравлического сопротивления при  $t_r = 0$ . При температурах  $t_r < 500$  °С величина  $C_{\text{сл}}$  растет с повышением температуры относительно быстрее, чем при  $t_r > 500$  °С.

Таблица 3

#### Пояснения к рис. 2

Table 3. Explanations for Fig. 2

| Номер кривой на рис. 2 | Концентрат | Фракция, мм     | $d_{\text{cp}}$ , мм | Метод расчета $d_{\text{cp}}$ | Вид окатышей                    | $m$    | Метод получения зависимости $\Delta p = f(w)$ | $C_{\text{сл}}$                                                      | Источник |
|------------------------|------------|-----------------|----------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|----------|
| 1                      | Тулачермет | $11,5 \pm 10$ % | 11,50                | Среднестатистический          | Восстановленные                 | 0,410  | Эксперимент                                   | –                                                                    | –        |
| 2                      | Зарубежный | 9,5 – 12,5      | 10,94                | Среднеобъемный                | Обоженные в лаборатории         | 0,408  | Эксперимент                                   | –                                                                    | [12]     |
| 3                      | ЮГОК       | –               | 11,30                | Не указан                     | Сухие и обоженные в лаборатории | 0,317* | Расчет** по формуле (2)                       | $\frac{1}{2d_{\text{cp}}} \frac{100}{\text{Re}_{\text{сл}}^{0,214}}$ | [1]      |
| 4                      | ССГОК      | 10,0 – 12,5     | 11,30                | Средневзвешенный              | Сухие                           | 0,449  | –                                             | 840                                                                  | [2]      |

\* По данным работы [1] соответствует  $d_{\text{cp}} = 12$  мм.

\*\* Расчет произведен авторами статьи.

Из рис. 3, б видно, что величина  $C_{сл}$  наиболее сильно зависит от скорости фильтрации при  $w_r < 1,0$  м/с, причем с уменьшением  $w_r$  происходит все более быстрое возрастание коэффициента  $C_{сл}$ . При изменении  $w_r$  от 0,3 до 1,5 м/с различие в величине  $C_{сл}$  может быть в 30 – 40 % (авторы работ [2, 7] пренебрегают этими различиями – см. штриховые линии 6, 7 на рис. 3, б). Следует отметить тот факт, что кривые 8, 9 при увеличении  $w_r$  приближаются к линии 7 ( $C_{сл7} = \text{const}$ ). При скорости  $w_r = 3$  м/с величины коэффициентов  $C_{сл}$ , рассчитанные по формулам (7) – (9), будут соответственно равны  $C_{сл7} = 632$ ,  $C_{сл8} = 636$ ,  $C_{сл9} = 608$  м<sup>-1</sup>, т. е. различие не более 4 %. Сравнение не совсем законно, потому что авторы работы [1] ограничивают область применения своей формулы  $w_r < 1,65$  м/с. Но с учетом рис. 3, б можно заключить, что с возрастанием скорости фильтрации формулы (7) – (9) согласуются значительно лучше. Особенно хорошо при  $w_r = 3$  м/с совпадают величины  $C_{сл7}$  и  $C_{сл8}$ , хотя при  $w_r = 0,3$  м/с они различаются на 60 %. Причина этого заключается в том, что по формуле (7) (соответствует с точностью  $\pm 5$  % графику на рис. 2 [2]) коэффициенты  $C_{сл7}$  получаются заниженными, так как соответствуют скоростям фильтрации 2 – 3 м/с, а в действительности коэффициенты  $C_{сл}$  с уменьшением скорости фильтрации растут и довольно существенно. Это подтверждают исследования многих авторов, в том числе авторов зависимости (7) [2].

На рис. 4 показаны результаты расчета коэффициента  $C_{сл}$  по данным работы [4] при скоростях фильтрации 2, 3 и 4 м/с в зависимости от размера окатышей. Видно, что величина  $C_{сл}$  слабо зависит от скорости фильтрации лишь при  $w_r > 3$  м/с (относительная разность  $C_{сл}$  при  $w_r = 3$  и 4 м/с уже сравнительно невелика). При этом с увеличением скорости фильтрации величина коэффициента  $C_{сл}$  становится ниже. Поэтому, по данным авторов работы [2], зависимостью коэффициента  $C_{сл}$  от размера  $d$  при скоростях  $w_r < 2$  м/с пользоваться нельзя, так как при этом получаются заниженные значения  $C_{сл}$ . Это было видно уже на рис. 2, где кривая 4 при скоростях  $w_r < 1$  м/с проходит существенно ниже, чем, например, кривая 3.

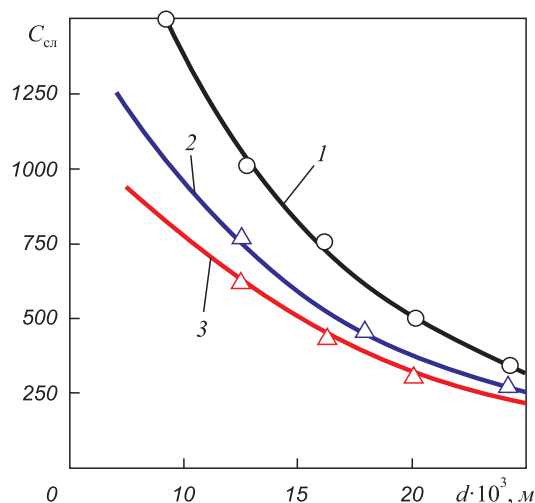


Рис. 4. Зависимость приведенного коэффициента  $C_{сл}$  от размера окатышей при  $w_r$ , м/с:  
1 – 2; 2 – 3; 3 – 4 по данным работы [4]

Fig. 4. Dependence of the reduced  $C_{сл}$  coefficient from the size of the pellets at  $w_r$ , m/s:  
1 – 2; 2 – 3; 3 – 4 according to [4]

Более отчетливо, чем на рис. 2, расхождение результатов, по данным авторов исследований [1, 2], видно из табл. 4, где приведены расчеты величины гидравлического сопротивления для слоя с параметрами  $d = 11,3$  мм,  $H = 1$  м,  $t_r = 0$  °С,  $w_r = \text{var}$  (позициям 1, 2 в табл. 4 соответствуют кривые 3, 4 на рис. 2). Как видно из табл. 4, занижение величины  $\Delta p$  по данным работы [2] при  $w_r = 0,4 – 0,8$  м/с достигает 25 – 35 %. При этом причина этих расхождений не в том, что опытные данные работ [2, 7] не подтверждают увеличения  $C_{сл}$  при уменьшении  $w_r$ . В табл. 5 приведены результаты расчета  $C_{сл}$  по опытным данным (рис. 3) [10], которые используются в работах [2, 7], и по формуле (8). Совпадение результатов очень хорошее, хотя авторы работ [2, 7] получили по этим данным значение  $C_{сл} = 981$  м<sup>-1</sup>, соответствующее  $w_r \approx 2$  м/с, т. е. заниженное для малых значений  $w_r$ .

На рис. 5 даны результаты расчета коэффициента  $C_{сл} = f(d)$  по формуле (8) [1] для скоростей фильтрации

Таблица 4

Сравнение величины гидравлического сопротивления слоя при расчете по формулам [1, 2] ( $H = 1$  м,  $d = 11,3$  мм)

Table 4. Comparison of the flow resistance of the layer in calculation by the formulas [1, 2] ( $H = 1$  м,  $d = 11,3$  мм)

| Номер п/п | Расчетные выражения                                                            | Значения $\Delta p$ , Па при $w_r$ , м/с |     |     |     |      |      |      | Источник |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|----------|
|           |                                                                                | 0,2                                      | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0  | 1,2  | 2,0  |          |
| 1         | $\Delta p_1 = \frac{100}{\text{Re}_{сл}^{0,214}} \frac{\rho_r w_r^2}{2d_{ср}}$ | 77                                       | 261 | 540 | 904 | 1345 | 1860 | 4640 | [1]      |
| 2         | $\Delta p_2 = 840 \rho_r w_r^2$                                                | 44                                       | 173 | 390 | 693 | 1083 | 1560 | 4330 | [2]      |
| 3         | $100 \frac{\Delta p_1 - \Delta p_2}{\Delta p_1}, \%$                           | 43                                       | 34  | 28  | 23  | 19   | 16   | 7    | –        |

Сравнение приведенных коэффициентов  $C_{cl}$  при расчете по опытным данным [10] и по формуле (8) [1]Table 5. Comparison of calculated  $C_{cl}$  coefficients according to the experimental data [10] and according to the formula (8) [1]

| Расчетные выражения                                      | $C_{cl}$ при $w_r$ , м/с |      |      |     |     | Источник |
|----------------------------------------------------------|--------------------------|------|------|-----|-----|----------|
|                                                          | 0,5                      | 1,0  | 1,5  | 2,0 | 3,0 |          |
| $C_{cl} = \frac{\Delta p}{\rho_r w_r^2}$                 | 1300*                    | 1160 | 1020 | 970 | 990 | [12]     |
| $C_{cl} = \frac{1}{2d_{cp}} \frac{100}{Re_{cl}^{0,214}}$ | 1315                     | 1130 | 1040 | 980 | 895 | [1]      |

\* Найдено с помощью аппроксимации.

0,25, 0,50, 1,0 и 2,0 м/с. Для сравнения на графике нанесен ряд значений величины  $C_{cl}$  для окатышей по данным работы [2] и рассчитанных по экспериментальным данным исследований [3, 12]. Данные работы [2] хорошо совпадают (несколько ниже) в диапазоне  $d = 10 - 20$  мм с результатами исследования [1] при скорости фильтрации  $w_r = 2$  м/с. При  $d = 10,56$  мм расчеты по данным опытной зависимости  $\Delta p = f(w_r)$  [12] хорошо совпадают с расчетом по [1]. Данные работы [3] при  $d = 11$  мм хорошо совпадают с результатами расчета по [1] при  $w_r = 2$  м/с и несколько хуже при  $w_r = 0,5$  м/с. Все это указывает на отсутствие противоречий данных работы [1] с результатами других исследований. Данные работы [2] при  $w_r \geq 2,0$  м/с,  $d = 10 - 20$  мм хорошо совпадают

с результатами других исследователей, однако при низких значениях скорости фильтрации (особенно при  $w_r < 1$  м/с) дают заниженные значения гидравлического сопротивления слоя (на 25 – 40 %) и в дальнейшем здесь не используются.

Таким образом, для расчета гидравлического сопротивления слоя окатышей остаются формулы (8) [1] и (9) [11]. Применение формулы (9) [11] авторы ограничивают по скорости фильтрации диапазоном  $w_r = 0,53 - 1,65$  м/с, по размеру окатышей – диапазоном  $d = 10 - 20$  мм. Для достижения конечного результата данного исследования эти ограничения слишком узки. Авторы работы [1] указывают, что проводили свои опыты при изменении скорости фильтрации от 0 до 4 – 5 м/с с окатышами размером 8 – 30 мм и никаких дополнительных ограничений на применимость формулы (8) не ввели. Результаты расчетов величины  $\zeta_{cl}$  (или  $C_{cl}$ ) при  $Re_{cl} = 200 - 2000$  [область применимости формулы (9)] [11] по формулам (8) и (9) совпадают с точностью до 10 – 20 %, хотя результаты по формуле (9) систематически ниже, что можно объяснить более низкой порозностью окатышей в опытах работы [11]. В дальнейшем предпочтение отдается формуле (8) [1] из-за отсутствия узких ограничений по ее применению. В результате проведенного анализа можно сделать вывод о том, что коэффициент гидравлического сопротивления слоя окатышей  $\zeta_{cl}$  при естественной засыпи в лабораторных условиях (при отсутствии значительного количества мелочи, т. е. критических по размеру фракций, отсутствии значительной сегрегации и др.) достаточно надежно можно рассчитывать по формуле [1]

$$\zeta_{cl} = \frac{100}{Re_{cl}^{0,214}}. \quad (6)$$

**Выводы.** С использованием коэффициентов гидравлического сопротивления проведены расчеты по определению гидравлического сопротивления плотного слоя, состоящего из частиц разной формы (шаровидные, куски произвольной формы, железорудные окатыши) по формулам ряда авторов. На основании

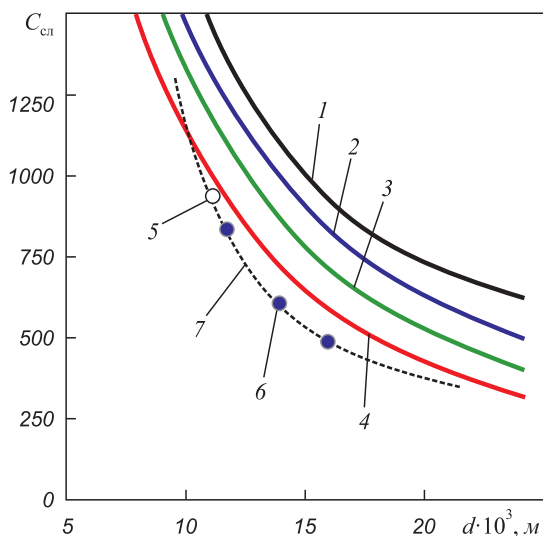


Рис. 5. Зависимость приведенного коэффициента  $C_{cl}$  от размера окатышей при  $w_r$ , м/с:  
1 – 0,25; 2, 5 – 0,50; 3 – 1,00; 4, 6 – 2,00; кр. 1 – 4 – расчет по данным [1]; 5 и 6 – расчет по данным [3] (светлые точки) и [12] (черные точки); 7 – данные работы [2]

Fig. 5. Dependence of the reduced  $C_{cl}$  coefficient from the size of the pellets at  $w_r$ , m/s:  
1 – 0,25; 2, 5 – 0,50; 3 – 1,00; 4, 6 – 2,00; curves 1 – 4 – calculation according to [1]; 5 and 6 – the calculation according to [3] (open circles) and [12] (black points); 7 – data [2]

анализа полученных результатов предложено выражение, позволяющее достаточно надежно рассчитывать гидравлические характеристики слоя окатышей, а, следовательно, оптимизировать как гидравлические, так и тепловые режимы обжига окатышей на ленте конвейерной машины.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ровенский И.И., Бережной Н.Н. Исследование газопроницаемости слоя окатышей // Изв. вуз. Черная металлургия. 1964. № 1. С. 27 – 32.
2. Кузнецов Р.Ф., Мерзляков Ю.И., Антуганова Г.М. Газопроницаемость неподвижного слоя железорудных окатышей: Сб. научных трудов ВНИИМТ «Теплотехника обжиговых и агломерационных машин конвейерного типа. Теплофизика сталеплавильных процессов». – М.: Металлургия, 1969. № 18. С. 11 – 14.
3. Schultr H.J., Abel O. Durchst rmung-sverhaltens von Formkoks-Erz-St kkoks-Systemen // Arch. Eisenh ttenw. 1974. 45. No. 5. S. 279 – 285.
4. Логинов В.И., Соломатин С.М., Корж А.Т. Газопроницаемость агломерата и окатышей: Сб. «Металлургия и коксохимия». – Киев: Техника, 1970. № 19. С. 46 – 51.
5. Стефанович М.А., Сибгатуллин С.К., Гушин Д.Н. Закономерности движения шихты и газа в доменной печи / Под ред. С.К. Сибгатуллина. – Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2011. – 161 с.

6. Гидравлический расчет трубопроводов и выбор тягодутьевых средств, обеспечивающих работу промышленных печей / С.Н. Гушин, М.Д. Казяев, Е.В. Киселев и др. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2011. – 140 с.
7. Чукин В.В., Кузнецов Р.Ф. Гидравлическое сопротивление неподвижного плотного слоя: Сб. науч. тр. ВНИИМТ «Теплотехника подготовки металлургического сырья». – М.: Металлургия, 1969. № 16. С. 50 – 59.
8. Бернштейн Р.С., Померанцев В.В., Шагало С.Л. Обобщенный метод расчета аэродинамического сопротивления нагруженных сечений: Сб. «Вопросы аэродинамики и теплопередачи в котельно-топочных процессах» / Под ред. Г. Ф. Кнорре. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1958. С. 267 – 289.
9. Четчин А.В. Высокотемпературные теплоносители. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 424 с.
10. Червоткин В.В., Минаев Ю.Е. Аэродинамическое сопротивление кусковой руды: Сб. науч. тр. ВНИИМТ «Теплотехника подготовки металлургического сырья». – М.: Металлургия, 1969. № 16. С. 67 – 75.
11. Теплотехника окискования железорудного сырья / С.Г. Братчиков, Ю.А. Берман, Я.Л. Белоцерковский и др. – М.: Металлургия, 1970. – 343 с.
12. Чукин В.В., Кузнецов Р.Ф. Гидравлическое сопротивление неподвижного и подвижного слоев кусковых материалов: Сб. науч. тр. ВНИИМТ «Обжиг руд, плавильные печи, нагрев и охлаждение стали». – Свердловск: ВНИИМТ, 1967. № 17. С. 26 – 33.

Поступила 6 апреля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 9, pp. 688–695.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE HYDRAULIC RESISTANCE DESCRIPTIONS IN A DENSE LAYER OF DIFFERENT SHAPE PARTICLES

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

**Gol'tsev V.A.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (v.a.goltsev@urfu.ru)

**Lugovkin V.V.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy"

**Yarchuk V.F.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy"

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

**Abstract.** The results of the analysis of calculated expressions obtained by different researchers to determine the hydraulic resistance of the dense layer consisting of different types (spherical particles, pellets, particles of arbitrary shape) were presented. The powered hydraulic resistance coefficient was used as a criterion to identify common patterns depending on the hydraulic resistance of the layer on the temperature and the rate of filtration. It is shown that depending on the nature of the hydraulic resistance of the layer porosity hardly affects the shape of the particles. The authors have recommended the formula by which you can reliably calculate the coefficient of hydraulic resistance of the pellet layer in their natural filling and the absence of a significant amount of detail, and therefore determine the energy loss in the layer and in general throughout the gas path in roasting plants.

**Keywords:** layer, particles, pellets, analysis, flow resistance, porosity, filtration rate, energy loss.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-688-695

## REFERENCES

1. Rovenskii I.I., Berezhnoi N.N. Investigation of gas permeability of pellets layer. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1964, no. 1, pp. 27–32. (In Russ.).
2. Kuznetsov R.F., Merzlyakov Yu.I., Antuganova G.M. The gas permeability of the fixed bed of iron ore pellets. In: *sb. nauchnykh trudov VNIIMT "Teplotekhnika obzhigovykh i aglomeratsionnykh mashin konveyernogo tipa. Teplofizika staleplavil'nykh protsessov"* [In: Proceedings of VNIIMT: "Heat engineering of firing and sintering machines of conveyor type. Thermal physics of steelmaking processes"]. Moscow: Metallurgiya, 1969, no. 18, pp. 11–14. (In Russ.).
3. Schultr H.J., Abel O. Durchst rmung-sverhalten von Formkoks-Erz-St kkoks-Systemen. *Arch. Eisenh ttenw*, 1974. 45, no. 5, pp. 279–285.
4. Loginov V.I., Solomatin S.M., Korzh A.T. Gas permeability of sinter and pellets. In: *Metallurgiya i koksokhimiya* [Metallurgy and coke industry]. Kiev: Tekhnika, 1970, no. 19, pp. 46–51. (In Russ.).
5. Stefanovich M.A., Sibgatullin S.K., Gushchin D.N. *Zakonomernosti dvizheniya shikhty i gaza v domennom pechi: monografiya* [Laws of motion of charge and gas in blast furnace: A monograph]. Sibgatullin S.K. ed. Magnitogorsk: Izd-vo Magnitogorsk. gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova, 2011, 161 p. (In Russ.).
6. Gushchin S.N., Kazyayev M.D., Kiselev E.V., Shavrin V.S., Yur'ev B.P. *Gidravlicheskiy raschet truboprovodov i vybor tyagodut'evykh sredstv, obespechivayushchikh rabotu promyshlennykh pechei* [Hydraulic calculation of pipelines and forced-draft choice of means to ensure the work of industrial furnace]. Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo fed. un-ta, 2011, 140 p. (In Russ.).
7. Chukin V.V., Kuznetsov R.F. Hydraulic resistance of the still dense layer. In: *sb. nauchnykh trudov VNIIMT "Teplotekhnika podgotovki*

- metallurgicheskogo syr'ya*" [Proceedings of VNIIMT "Heat preparation of metallurgical raw materials"]. Moscow: Metallurgiya, 1969, no. 16, pp. 50–59. (In Russ.).
8. Bernshtein R.S., Pomerantsev V.V., Shagalova S.L. The generalized method of calculating the aerodynamic resistance of the loaded sections. In: *Voprosy aerodinamiki i teploperedachi v kotel'no-topchnykh protsessakh* [Questions of aerodynamics and heat transfer in the boiler-furnace process]. Knorre G.F. ed. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 1958, pp. 267–289. (In Russ.).
  9. Chechetkin A.V. *Vysokotemperaturnye teplonositeli* [High-temperature heat transfers]. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat, 1962. 424 p. (In Russ.).
  10. Chervotkin V.V., Minaev Yu.E. The aerodynamic drag of lump ore. In: *sb. nauchnykh trudov VNIIMT "Teplotekhnika podgotovki metallurgicheskogo syr'ya"* [Proceedings of VNIIMT "Heat preparation of metallurgical raw materials"]. Moscow: Metallurgiya, 1969, no. 16, pp. 67–75. (In Russ.).
  11. Bratchikov C.G., Berman Yu.A., Belotserkovskii Ya.L. *Teplotekhnika okuskovaniya zhelezorudnogo syr'ya* [Heat engineering of iron ore agglomeration]. Moscow: Metallurgiya, 1970. 343 p. (In Russ.).
  12. Chukin V.V., Kuznetsov R.F. Hydraulic resistance of fixed and moving layers of lump materials. In: *sb. nauchnykh trudov VNIIMT "Obzhig rud, plavil'nye pechi, nagrev i okhlazhdenie stali"* [Proceedings of VNIIMT "Firing of ores, melting furnaces, heating and cooling of steel"]. Sverdlovsk: VNIIMT, 1967, no. 17, pp. 26–33. (In Russ.).

Received April 6, 2015

УДК 621.77.07

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В РАБОЧИХ ВАЛКАХ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ПРИ УСКОРЕННОМ НАГРЕВЕ В КАМЕРНОЙ ПЕЧИ

**Казяев М.Д.<sup>1</sup>**, к.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика  
в металлургии» (termocomplex@r66.ru)

**Самойлович Ю.А.<sup>2</sup>**, д.т.н., профессор, старший научный сотрудник  
лаборатории нагревательных печей (platan09@yandex.ru)

**Палеев В.С.<sup>2</sup>**, к.т.н., главный специалист

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

<sup>2</sup> ООО «НПК «УралТермоКомплекс»  
(620137, Россия, Екатеринбург, ул. Посадская, 23, оф. 306 – 308)

**Аннотация.** Приведена физико-математическая модель расчета термонапряженного состояния рабочих валков холодной прокатки при нагреве в камерной печи скоростного (градиентного) нагрева под закалку. Нагревательная печь выполнена из двух раздвигающихся половин и совмещена со спрейерной установкой. Валок, подвергающийся нагреву, устанавливается на роликах и вращается в процессе нагрева и закалки. Сопоставлены два режима нагрева – форсированный и более рациональный, у которого введено ограничение скорости нагрева валка в начальной стадии. Предложен ступенчатый график повышения температуры греющей среды при нагреве валка, в котором максимальные растягивающие напряжения не превышают приемлемых значений порядка 300 МПа. В целях снижения термических напряжений при нагреве валков рекомендуется ограничивать скорость нагрева на начальной стадии тепловой обработки.

**Ключевые слова:** валки холодной прокатки, математическое моделирование, термические напряжения, скоростной нагрев.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-696-702

Агрегат дифференцированной термообработки (АДТО) предназначен для скоростного градиентного нагрева рабочих валков холодной прокатки и последующего ускоренного охлаждения с целью закалки рабочего слоя валка.

Агрегат состоит из камерной печи с раздвигающимися по оси рабочим пространством и совмещенной спрейерной установкой, обеспечивающей предельное сокращение времени между нагревом валка и его охлаждением. Камерная печь отапливается природным газом, сжигаемым в скоростных горелках, работающих в импульсном режиме. Воздух для горения газа подогревается в рекуператоре за счет тепла уходящих из печи продуктов сгорания.

В исходном положении печь для нагрева, состоящая из двух половин, находится в разомкнутом состоянии. Предложенная технология ДТО предусматривает нагрев под закалку рабочего слоя бочки валка, тогда как шейки валка защищены от нагрева специальными теплоизолирующими вставками. Внутреннее (рабочее) пространство печи имеет цилиндрическую форму.

Перед началом нагрева валок устанавливают шейками на ролики, вращение которых в процессе нагрева

обеспечивает симметрию температурного поля поверхности бочки.

При достаточно ограниченном объеме рабочего пространства печи поверхность валка подвергается интенсивному теплообмену со стороны греющих газов, поступающих из установленных вдоль камеры газовых горелок. Интенсивная циркуляция продуктов сгорания природного газа в рабочем пространстве печи сопровождается существенным увеличением доли конвективного теплообмена в суммарном тепловом потоке, воспринимаемым поверхностью валка, и повышением скорости его нагрева. Связанное с этим повышение производительности агрегата и снижение расхода топлива является экономически выгодным.

Вместе с тем, повышение скорости нагрева поверхности валка сопровождается увеличением градиента температур по его сечению и соответствующим ростом растягивающих термических напряжений. В результате возникает реальная опасность нарушения сплошности (разрушения) валка под воздействием возникающих при чрезмерно интенсивном нагреве термических напряжений.

Ниже изложены результаты моделирования температурных полей и термических напряжений в рабочем валке холодной прокатки, нагреваемом в печи скоростного нагрева, и предложен режим, при котором минимизируется вероятность разрушения валка под воздействием внутренних термических напряжений.

Математическая модель, используемая при расчетах температурного поля нагреваемого валка, основана на численном решении уравнения нестационарной теплопроводности, в котором учитывается симметрия поля температуры относительно продольной оси валка:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(r, z, t), \quad (1)$$

где  $T$  – температура;  $t$  – время;  $\rho$ ,  $C$ ,  $\lambda$  – массовая плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность стали соответственно;  $Q$  – теплота, сопровождающая процессы превращения аустенита;  $r$ ,  $z$  – координаты вдоль радиуса и продольной оси валка.

Решение уравнения теплопроводности (1) осуществляется для валка цилиндрической формы при задании диаметра бочки  $D = 2R = 504$  мм и длины  $L = 1200$  мм.

На поверхности бочки валка используется граничное условие

$$\lambda \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{\text{пов}} = \alpha_k (T_G - T_{\text{пов}}) + \sigma (T_G^4 - T_{\text{пов}}^4), \quad (2)$$

где  $T_G$  – температура греющей среды;  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи конвекцией от потока греющих газов к поверхности валка;  $\sigma$  – коэффициент теплообмена излучением;  $T_{\text{пов}}$  – температура поверхности валка, принимаемая одинаковой вдоль всей его поверхности. Система уравнений (1, 2) дополняется начальным условием

$$T(r, z, 0) = T_0. \quad (3)$$

Коэффициент теплообмена излучением  $\sigma$  в рабочем пространстве печи определяется по формуле Д.В. Будрина [1, 2]

$$\sigma = C_0 \frac{\varepsilon_M \left[ \left( \frac{F_K}{F_M} \right) + 1 - \varepsilon_\Gamma \right]}{\left[ \varepsilon_M + \varepsilon_\Gamma (1 - \varepsilon_M) \right] \frac{1 - \varepsilon_\Gamma}{\varepsilon_\Gamma} + \left( \frac{F_K}{F_M} \right)}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_\Gamma$ ,  $\varepsilon_M$  – степень черноты газов и поверхности валка соответственно;  $F_K$ ,  $F_M$  – площади поверхности кладки и валка, равные  $F_K = 2\pi R_K L$ ,  $F_M = 2\pi R_0 L$ .

Расчеты по формуле (4) с учетом конкретных значений степени черноты продуктов сгорания природного газа и поверхности футеровки приводят к величине коэффициента теплообмена излучением, изменяющийся в пределах  $(2,30 - 2,38) \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Решение системы уравнений (1) – (3) осуществляется с учетом зависимости коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры с использованием известных экспериментальных данных для валковых сталей.

Термические напряжения в прокатных валках в процессе термообработки определяются в соответствии с основными положениями теории термовязкоупругости [3].

В расчетах используется решение задачи нелинейной термовязкоупругости для бочки валка, которая обладает формой цилиндра диаметром  $D$  и длиной  $L$ , в предположении осесимметричного поля температур в поперечном сечении цилиндра.

При этом система уравнений термовязкоупругости имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} 2Ge_r^* &= S_r^* + \frac{1}{\tau} S_r; \\ 2Ge_\theta^* &= S_\theta^* + \frac{1}{\tau} S_\theta; \\ 2Ge_z^* &= S_z^* + \frac{1}{\tau} S_z, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} e_j^* &= \frac{\partial e_j}{\partial t}, \quad S_j^* = \frac{\partial S_j}{\partial t}; \\ e_r &= \varepsilon_r - \varepsilon, \quad e_\theta = \varepsilon_\theta - \varepsilon, \quad e_z = \varepsilon_z - \varepsilon; \\ S_r &= \sigma_r - \sigma, \quad S_\theta = \sigma_\theta - \sigma, \quad S_z = \sigma_z - \sigma. \end{aligned} \quad (6)$$

Динамические уравнения (5) дополняются уравнением равновесия

$$\frac{\partial e_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (7)$$

и уравнением взаимосвязи средних значений деформаций и напряжений с локальным изменением температуры  $\delta T$

$$\varepsilon = N\sigma + \alpha\delta T, \quad (8)$$

где  $N = \frac{1-\nu}{E}$ ,  $\varepsilon$ ,  $\sigma$  – средние значения деформаций и напряжений;  $\tau$  – время релаксации, определяемое по формуле Френкеля

$$\tau = \frac{\eta}{G},$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости стали;  $G$  – модуль сдвига, связанный с модулем упругости  $E$  соотношением  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ , где  $\nu \cong 0,33 - 0,35$  – число Пуассона.

Решение системы уравнений (5) – (8) при известном изменении поля температур позволяет рассчитать компоненты тензора деформаций и напряжений в стальных валках цилиндрической формы при соблюдении усло-

вия симметрии всех переменных ( $T$ ,  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$ ) относительно продольной оси вала.

Более детальное изложение методики расчета термических напряжений в нагреваемых прокатных валах представлено в работах [4 – 6].

Порядок вычисления главных компонент тензора напряжений в стальных валах при их нагреве перед закалкой сводится к следующей последовательности операций:

- определение температур и скоростей нагрева по всему объему бочки вала путем численного решения задачи нестационарной теплопроводности с учетом зависимости теплофизических свойств стали от температуры;
- вычисление вспомогательных термомеханических параметров задачи (модуля упругости, модуля сдвига, времени релаксации) в зависимости от температуры;
- решение нелинейной задачи термоупругости для бочки вала с учетом зависимости механических свойств стали от температуры;
- определение главных компонент тензора напряжений в бочке вала с учетом эффекта релаксации напряжений при известной зависимости времени релаксации стали от температуры.

В соответствии с изложенной выше математической моделью исследовано термонапряженное состояние валков холодной прокатки диаметром 504 мм из стали 8Х3СМФ следующего химического состава, % (по массе): 0,81 С; 0,53 Si; 0,64 Mn; 3,21 Cr; 0,15 Ni; 0,25 Mo; 0,12 V;  $\leq 0,02$  P;  $\leq 0,013$  S.

За счет повышенного содержания хрома данная сталь обладает достаточно высокой прокаливаемостью, что вызывает необходимость обеспечить при нагреве под закалку глубину прогреваемого слоя у поверхности бочки вала не менее 50 – 60 мм.

Согласно разработанной технологии валки из данной стали необходимо нагреть под закалку до 1000 – 1010 °С с последующей выдержкой при этих температурах в течение 40 – 50 мин (критические точки стали 8Х3СМФ:  $A_{c3} = 875$  °С;  $M_n = 280$  °С).

Для выявления закономерностей термонапряженного состояния нагреваемых валков ниже сопоставлены поля термических напряжений в бочке вала при двух режимах нагрева – форсированном и более рациональном, при котором скорость повышения температуры поверхности вала при посадке в печь поддерживается ограниченной ввиду чрезмерно высоких термических напряжений, возникающих в центре нагреваемого вала.

На рис. 1, а представлено изменение во времени температур в трех представительных точках вала, нагреваемого при форсированном режиме, который характеризуется быстрым подъемом температуры греющих газов и футеровки камерной печи с 300 до 1100 °С.

Из расчетов следует, что при форсированном режиме нагрева в течение 4,45 ч (16 000 с) температура на поверхности бочки вала и на глубине прогреваемого слоя, расположенного на расстоянии 50 мм от поверхности, достигает необходимого значения 1000 – 1010 °С.

На рис. 1, б представлено изменение во времени продольных напряжений в трех точках по сечению бочки вала.

Из анализа расчетов следует, что в начальной стадии нагрева (в интервале 0,7 – 0,9 ч от начала нагрева) растягивающие, т. е. наиболее опасные напряжения в центре вала достигают чрезмерно высоких значений (600 – 700 МПа), что представляет собой реальную угрозу нарушения сплошности металла при наличии дефектов микроструктуры, играющих роль концентраторов напряжений.

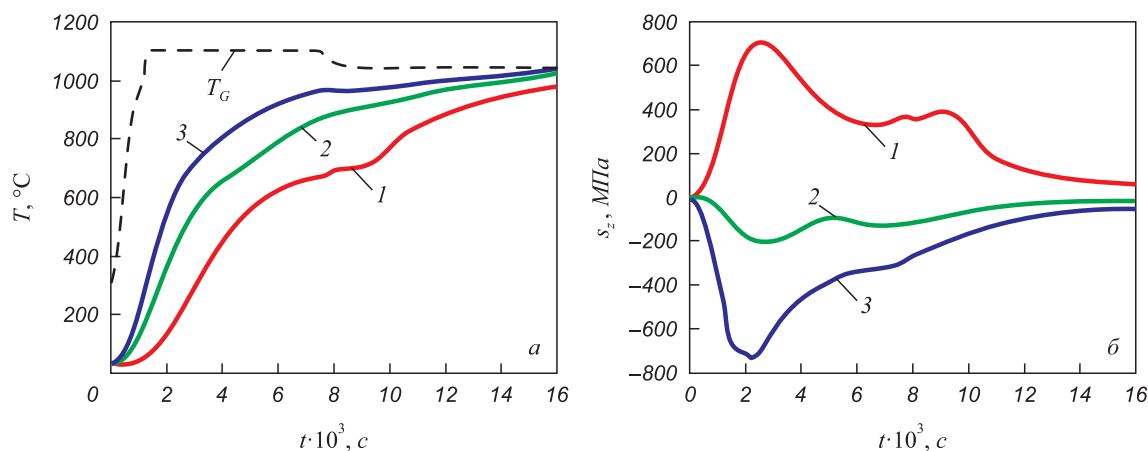


Рис. 1. Изменение во времени температур (а) и продольных напряжений (б) в трех точках по радиусу бочки вала диаметром 504 мм из стали 8Х3СМФ при форсированном режиме нагрева:

1 – в центре вала; 2 – на глубине рабочего слоя; 3 – на поверхности вала

Fig. 1. Change of temperature (a) and longitudinal stress (b) versus time measured in the following three points over the radius of the body of the 504 mm diameter roll made of steel 8Kh3SMF under forced heating conditions:

1 – in the roll center; 2 – at a depth of the working layer; 3 – on the roll surface

Следует отметить, что при решении нелинейной задачи термовязкоупругости определяются три компоненты тензора напряжений: продольные, тангенциальные и радиальные.

Из расчетов следует, что среди трех указанных компонент тензора напряжений наибольших значений достигают растягивающие (наиболее опасные) напряжения, являющиеся продольными напряжениями, направленными по нормали к поперечному сечению вала.

В связи с этим, при сопоставлении возникающих в нагреваемом валке внутренних напряжений с допускаемыми напряжениями, следует использовать полученные расчетом значения максимальных продольных напряжений в осевой зоне нагреваемого вала. В подтверждение данного тезиса можно привести результаты экспериментов, выполненных при определении допускаемой скорости нагрева слитков из быстрорежущей стали [7].

В кузнечном цехе Челябинского металлургического завода нагрев под ковку отожженных слитков стали Р18 массой 600 – 610 кг производился с большими предосторожностями: температура в окне погрузки методической печи, согласно технологической инструкции, не превышала 450 °С. При изыскании возможности повышения производительности нагревательной печи были проведены эксперименты, цель которых состояла в подтверждении возможности безопасного нагрева слитков при более высоких температурах погрузки в методическую печь.

Эксперименты проводили в специальной камерной печи (внутренние размеры 1350×1860×3580 мм), отапливаемой смесью коксового и доменного газов с помощью шести инжекционных горелок. Всего было исследовано 11 слитков – восемь отожженных и три неотожженных.

Слитки загружали в печь, предварительно разогретую до 1000 – 1200 °С. На одном из слитков при разливке вмонтировали две графито-кварцевые трубки для

формирования отверстий в центре и вблизи поверхности слитка. В данные отверстия при последующем нагреве в камерной печи разместили хромель-алюмелевые термопары для измерения температур нагреваемого слитка.

Эксперименты показали возможность безопасного нагрева полностью отожженных слитков при их погрузке в печь с начальной температурой 700 °С, выдержкой в течение 4 ч при этой температуре и последующем подъеме температуры печи до 1200 °С.

При размещении неотожженных слитков в печи, разогретой до 1000 °С, зафиксировали их разрушение через 10 – 15 мин после загрузки в печь. На рис. 2 показан вид обломков одного из разрушенных слитков, извлеченных из камерной печи. Из приведенной фотографии следует, что разрушение слитка под влиянием термических напряжений произошло в плоскости, перпендикулярной оси слитка, что служит подтверждением упомянутых выше результатов расчетного анализа относительно доминирующей роли продольных растягивающих напряжений.

Как отмечено выше, безопасным для сохранения сплошности металла оказался режим нагрева, при котором в печь с начальной температурой 700 °С загружали полностью отожженные слитки, освобожденные от остаточных напряжений.

Приведенная выше математическая модель термонапряженного состояния нагреваемых стальных изделий цилиндрической формы подтверждает необходимость учета остаточных напряжений при расчетной оценке допускаемой скорости нагрева стальных изделий.

На рис. 3 приведены графики изменения во времени температур и продольных напряжений на поверхности и в центре стальных слитков неотожженной стали Р18 при ускоренном нагреве в камерной печи. Отметим, что расчетные графики изменения температур во времени на поверхности и в центре слитка вполне удовлетворительно согласуются с результатами термометрирования [7].

Согласно расчету, в начальной стадии нагрева (через 20 мин после погрузки слитка в печь) максимальные растягивающие напряжения в центре слитка достигают 585 МПа. Расчеты остаточных напряжений в слитке, остывающем в изложнице, позволяют оценить максимальные их значения порядка 350 МПа [7]. Таким образом, в сумме остаточные и максимальные временные напряжения (при нагреве) составляют 910 – 920 МПа, в то время как допускаемые напряжения для быстрорежущей стали не должны превышать 600 – 700 МПа [8].

Изложенные данные подтверждают необходимость учета продольной компоненты тензора напряжений при расчетной оценке допускаемой скорости нагрева прокатных валков, а также важность устранения остаточных напряжений в прокатных валках путем их отжига на предварительной стадии подготовки валков к закалке.

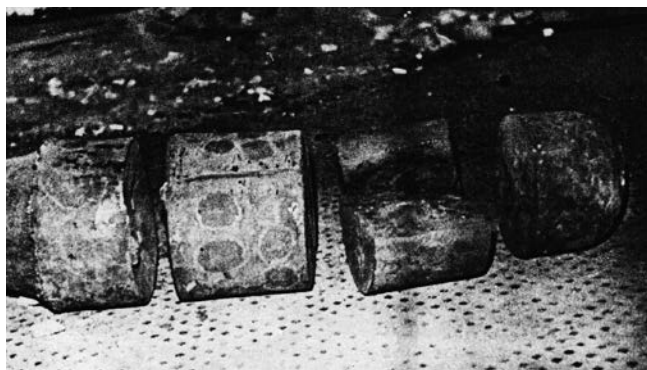


Рис. 2. Внешний вид неотожженного слитка стали Р18 массой 610 кг после погрузки в печь с температурой 1000 °С

Fig. 2. A view from the outside of the un-annealed ingot of 610 kg mass made of steel R18 after placing into the furnace at a temperature of 1000 °С

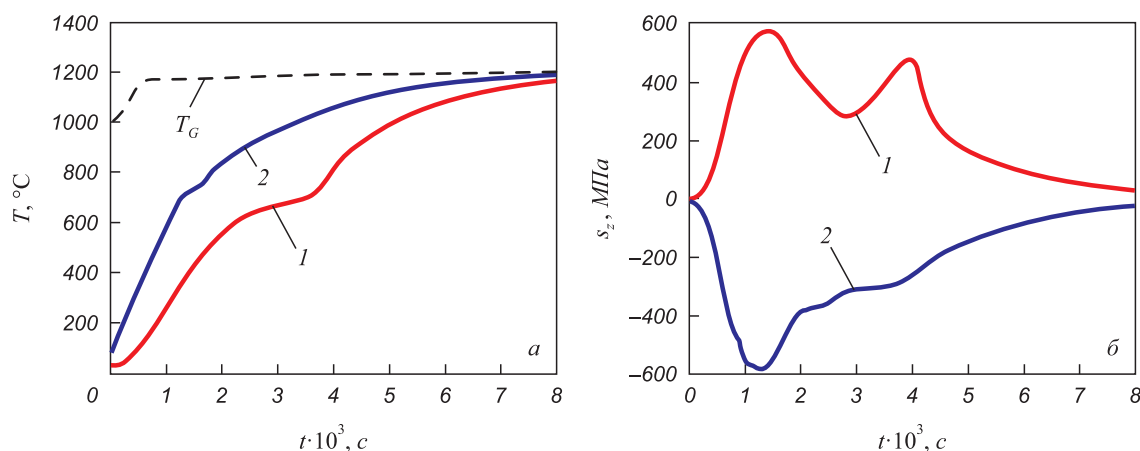


Рис. 3. Изменение во времени температур (а) и продольных напряжений (б) в двух точках неотожженного слитка стали R18 при ускоренном нагреве в камерной печи:

1 – в центре слитка; 2 – на поверхности слитка

Fig. 3. Change of temperature (a) and longitudinal stress (b) versus time measured in the following two points of the ingot of steel R18 under fast heating conditions in the chamber furnace:

1 – in the ingot center; 2 – over the ingot surface

Вместе с тем, необходимо ограничить скорость нагрева валков в начальной стадии с целью снижения возникающих термических напряжений.

Накопленный производственный опыт свидетельствует о том, что удастся избежать возникновения дефектов типа трещин под воздействием временных растягивающих напряжений в том случае, если поддерживать в начальной стадии нагрева скорость повышения температуры поверхности нагреваемых валков, не превышающую 6 – 9 град/мин. Кроме того, рекомендуется на заключительной стадии нагрева обеспечить выдержку валка перед началом закалки в течение 50 – 60 мин (для валков с содержанием хрома от 3 до 5 % и диаметром 450 – 550 мм).

С целью реализации указанных рекомендаций предложен ступенчатый режим нагрева валков перед закалкой, предполагающий разделение общей длительности нагрева на четыре этапа. Первый этап заключается в нагреве валка от начальной температуры  $T_0$  до температуры выдержки  $T_B$  за время  $\Delta t_1$  со скоростью  $W_1$ . Затем следует выдержка при неизменной температуре  $T_B$  в течение интервала времени  $\Delta t_2$  (второй этап). Далее осуществляется подъем температуры валка до температуры аустенизации  $T_A$  со скоростью  $W_2$  за время  $\Delta t_3$  (третий этап) с последующей выдержкой в течение интервала времени  $\Delta t_4$  (четвертый этап).

На рис. 4, а приведены результаты расчета температуры греющих газов, а также температур в трех пред-

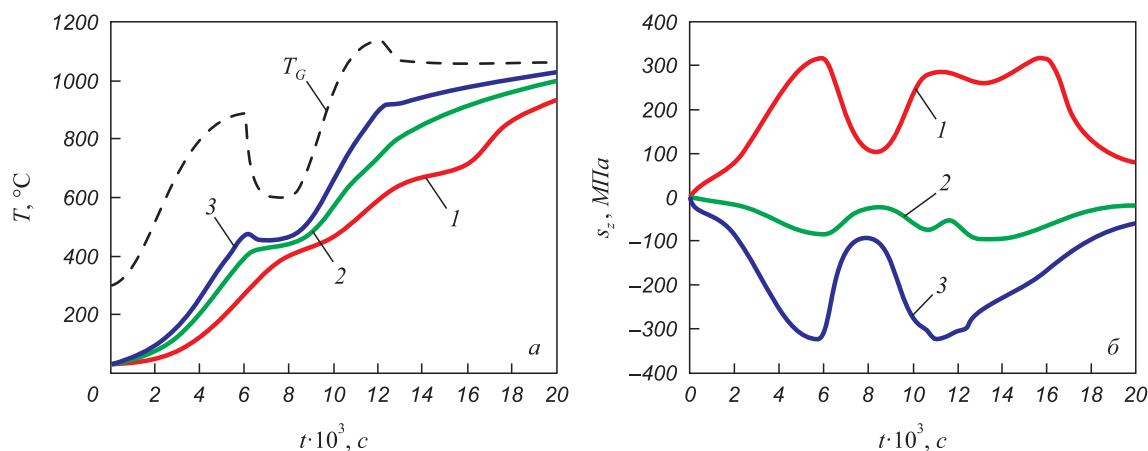


Рис. 4. Изменение во времени температур (а) и продольных напряжений (б) в трех точках по радиусу бочки валка диаметром 504 мм из стали 8ХЗСМФ при ступенчатом режиме нагрева:

1 – в центре валка; 2 – на глубине рабочего слоя; 3 – на поверхности валка

Fig. 4. Change of temperature (a) and longitudinal stress (b) versus time in the following three points over the radius of the body of the 504 mm diameter roll made of steel 8Kh3SMF under stage heating conditions:

1 – in the roll center; 2 – at a depth of the working layer; 3 – on the roll surface

ставительных точках вдоль радиуса бочки валка при ступенчатом режиме нагрева, удовлетворяющем указанным рекомендациям.

При этом начальная стадия процесса нагрева характеризуется значениями скорости повышения температуры поверхности валка в пределах  $W_1 = 8 - 9$  град/мин в течение 1,67 ч с последующей выдержкой валка при температуре 410 – 450 °С в течение 35 мин.

Как следует из рассмотрения графиков изменения продольных напряжений в трех точках по сечению бочки валка на рис. 4, б, задание ограниченной скорости нагрева в начальной стадии, вкупе с выдержкой валка при температуре 450 °С, сопровождается весьма существенным снижением максимальных растягивающих напряжений в центре валка по сравнению с форсированным режимом нагрева – с 700 до 310 МПа.

На последующих этапах нагрева валка с повышением температуры на его поверхности до температуры аустенизации, значения растягивающих напряжений в центре валка не превышают приемлемого уровня (300 – 305 МПа) с последующим снижением до 100 МПа в конце нагрева.

**Выводы.** Приведена физико-математическая модель термонапряженного состояния (ТНС) рабочих валков холодной прокатки при их нагреве в камерной печи скоростного нагрева.

Указывается на необходимость учета продольной компоненты тензора напряжений в осевой зоне валка при расчетной оценке допустимой скорости нагрева.

С использованием математической модели ТНС валка при нагреве под закалку сопоставлены два режима нагрева – форсированный и более рациональный, при

котором введено ограничение скорости нагрева на начальной стадии.

Для нагрева рабочего валка холодной прокатки диаметром 504 мм из стали 8ХЗСМФ в камерной печи предложен ступенчатый график повышения температуры греющей среды, при котором максимальные растягивающие напряжения не превышают приемлемых значений порядка 300 МПа, что исключает возможность разрушения изделия.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Будрин Д.В. Расчет лучистого теплообмена: Сб. «Теплообмен и вопросы экономии топлива в металлургических печах». – Свердловск: Изд-во УПИ, 1951. С. 13 – 37.
2. Теплотехнические расчеты металлургических печей. Изд. 2. / Б.Ф. Зобнин, М.Д. Казяев, Б.И. Китаев и др. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.
3. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. – М.: Мир, 1964. – 517 с.
4. Тимофеев В.Н., Самойлович Ю.А. Оценка влияния пластической деформации на температурные напряжения при нагреве стального цилиндра: Сб. тр. ВНИИМТ «Горение, теплообмен и процессы нагрева металла в печах». – Свердловск: Изд-во ВНИИМТ, 1963. № 10. С. 68 – 80.
5. Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Маточкин В.А. Теоретические основы расчета температур, термовязкоупругих напряжений и деформаций в корке непрерывнолитой заготовки // Изв. вуз. Энергетика. 2002. № 3. С. 48 – 56.
6. Самойлович Ю.А. Расчет временных и остаточных напряжений прокатных валков при электрозакалке // Изв. вуз. Черная металлургия. 2014. № 11. С. 15 – 22.
7. Тимошпольский В.И., Самойлович Ю.А., Трусова И.А. Стальной слиток. Т. 3: Нагрев. – Минск: Белорусская наука, 2001. – 879 с.
8. Баптизманский В.И. // Техническая физика. 1951. № 5. С. 105 – 113.

Поступила 7 июля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 9, pp. 696–702.

#### MATHEMATICAL MODELING OF THE THERMO-STRESSED CONDITION IN THE COLD WORK ROLLS DURING FAST HEATING IN THE CHAMBER FURNACE

**Kazyayev M.D.<sup>1</sup>**, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (termocomplex@r66.ru)

**Samoilovich Yu.A.<sup>1</sup>**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher of Laboratory of heating furnaces (platan09@yandex.ru)

**Paleev V.S.<sup>2</sup>**, Cand. Sci. (Eng.), Chief Specialist

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

<sup>2</sup> “UralTermoKompleks” Scientific and Production Company (23, of. 306-308, Posadskaya str., Ekaterinburg, Sverdlovsk Region, 620137, Russia)

**Abstract.** A physical-and-mathematical pattern of calculation of the thermo-stressed condition of the cold work roll, being heated in the chamber fast (gradient) heating furnace for hardening of the working layer of the certain depth, has been demonstrated. The heating fur-

nace consists of two sliding halves and is connected with the spraying unit. A roll subjected to heating runs on rollers and rotates during heating and hardening. Two heating conditions: forced one and more rational one, under which a speed of the roll heating is limited at the initial stage, have been compared. The authors have offered a step-type schedule of increasing the heating medium temperature during roll heating at which the maximum tensile stress does not exceed an acceptable value of 300 МПа. It is recommended to limit a heating speed at the initial stage of heat treatment to reduce the thermal stress.

**Keywords:** cold rolls, mathematical modeling, thermal stress, fast heating.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-696-702

#### REFERENCES

1. Budrin D.V. *Raschet luchistogo teploobmena* [The calculation of radiative heat transfer: A Collection.]. In: *Sb. Teploobmen i voprosy ekonomii topliva v metallurgicheskikh pechakh* [Heat transfer and economy of fuel in metallurgical furnaces]. Sverdlovsk, Moscow:

- Izd-vo Ural'skogo politekhnicheskogo instituta, 1951, pp. 13–37. (In Russ.).
2. Zobnin B.F., Kazyayev M.D., Kitaev B.I. etc. *Teplotekhnicheskie raschety metallurgicheskikh pechei* [Thermotechnical calculations of metallurgical furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1982. 360 p. (In Russ.).
3. Boley Bruno A., Weiner Jerome H. *Theory of Thermal Stresses*. New York : John Wiley & Sons, 1960. (Russ.ed.: Boley B., Weiner J. *Teoriya temperaturnykh napryazhenii*. Moscow: Mir, 1964. 517 p.).
4. Timofeev V.N., Samoilovich Yu.A. *Otsenka vliyaniya plasticheskoi deformatsii na temperaturnye napryazheniya pri nagreve stal'nogo tsilindra* [Estimation of influence of plastic deformation on thermal stresses during the heating of the steel cylinder]. In: *Sb. tr. VNIIMT "Gorenie, teploobmen i protsessy nagreva metalla v pechakh"* [Proceedings of VNIIMT "Burning, heat transfer processes and metal heating furnaces" ]. Izd. Sverdlovsk, 1963, pp. 68–80. (In Russ.).
5. Samoilovich Yu.A., Timoshpol'skii V.I., Trusova I.A., Matochkin V.A. Theoretical basis for calculating the temperatures of thermoviscoelastic stresses and deformations in the crust of continuous casting. *Izvestiya VUZov. Energetika*. 2002, no. 3, pp. 48–56. (In Russ.).
6. Samoilovich Yu.A. Calculation of temporal and residual voltage during the electrohardening of forming rolls. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, no. 11, pp. 15–22. (In Russ.).
7. Timoshpol'skii V.I., Samoilovich Yu.A., Trusova I.A. etc. *Stal'noi slitok*. [Steel Ingot]. Vol. 3. *Nagrev* [Heating]. Minsk: Belorusskaya nauka, 2001. 879 p. (In Russ.).
8. Baptizmanskii V.I. *Tekhnicheskaya fizika* [Technical physics]. 1951, no. 5, pp. 105–113. (In Russ.).

Received July 7, 2015

УДК 669.162.263

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В АСУП ДОМЕННОГО ЦЕХА

**Лавров В.В.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика  
в металлургии» (v.v.lavrov@urfu.ru)

**Спирин Н.А.<sup>1</sup>**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теплофизика и информатика в металлургии»

**Бурыкин А.А.<sup>1</sup>**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

**Щипанов К.А.<sup>1</sup>**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

**Рыболовлев В.Ю.<sup>2</sup>**, к.т.н., начальник проектного офиса

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

<sup>2</sup> ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»  
(455000, Россия, Магнитогорск, ул. Кирова, 93)

**Аннотация.** Рассмотрены требования, структура и архитектура АРМ «Технолог доменного цеха» компьютерной системы поддержки принятия решений MES-уровня, внедренной в АСУП доменного производства ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Представлено краткое описание основных модельных подсистем, а также допущения, принятые в процессе математического моделирования. Использование разработанной системы позволяет инженерно-технологическому персоналу оперативно проводить анализ производственных ситуаций доменного цеха, решать ряд технологических задач по управлению тепловым, газодинамическим и шлаковым режимами доменной плавки, а также производить расчет оптимального состава доменной шихты, что в конечном итоге обеспечивает повышение технико-экономических показателей работы доменного производства.

**Ключевые слова:** доменное производство, автоматизированная система управления производством, MES-система, анализ производственных ситуаций, решение технологических задач.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-703-709

Современная тенденция развития науки и техники характеризуется широким использованием компьютерных систем поддержки принятия решений в АСУП, в основу которых положены методы математического моделирования [1 – 5]. Роль алгоритмов и компьютерных программ для решения комплекса технологических задач в области металлургии MES-уровня (Manufacturing Execution Systems – системы управления технологией, производственными процессами) современных автоматизированных информационных систем крупнейших металлургических предприятий России в настоящее время становится все более очевидной [1, 2].

Это определяет потребность в разработке информационно-моделирующих систем, основу которых составляет комплекс математических моделей, учитывающих как физику процесса, основы теории тепло- и массообмена, законы сохранения энергии, так и особенности влияния технологических и стандартных характеристик сырья на показатели производственного процесса. Особое место в этом комплексе технологических операций получения металлопродукции отводится доменному переделу как самому энергоемкому и сложному, на долю которого приходится до 50 % топлива, используемого в черной металлургии.

В работе отражены результаты создания и внедрения автоматизированной системы анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха на ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК). Построение системы основано на следующих основных принципах.

- Система должна решать комплекс взаимосвязанных технологических задач. Инженерно-технологическому персоналу доменного цеха с помощью программного комплекса необходимо иметь возможность оперативно производить анализ работы металлургических агрегатов, оценивать текущее состояние хода технологического процесса, производить изучение и анализ наметившихся отклонений ключевых показателей, выявлять причины, повлекшие эти отклонения и разрабатывать мероприятия по повышению эффективности металлургического производства.
- Обязательным требованием к системе является обеспечение простоты и легкости ее использования, поскольку большинство пользователей являются не специалистами в области информационных технологий и моделирования доменного процесса.

- Непосредственную работу с системой осуществляют специалисты различных служб комбината, каждый из которых решает свои производственные задачи. В этой связи обязательным условием является наличие в системе модуля администрирования, разделения прав и категорий пользователей.
- Для выполнения заложенных функций система взаимодействует с другими информационными системами комбината (АСУ ТП, КИС). Поэтому реализованы возможности автоматического наполнения данными и передачи их между подсистемами, а также средства интеграции в корпоративную сеть предприятия.
- В процессе эксплуатации системы предполагается ее непрерывное развитие (добавление новых показателей в отчеты, возможность их сопоставления, уточнение моделей и настройка их параметров на условия работы топливно-сырьевой базы комбината и др.). Поэтому разработка системы выполнена на основе принципов модульного программирования с учетом современных технологий и средств программной реализации.

На основе вышеназванных принципов разработана структура системы, представленная на рис. 1. Основными подсистемами являются:

- «Сбор и хранение данных», основной функцией которой является заполнение базы данных фак-

- «Визуализация среднесменных и среднесуточных данных о работе доменных печей», которая обеспечивает построение графических трендов по выбранным пользователем параметрам в любой комбинации за указанный временной период;
- «Формирование технического отчета о работе доменных печей и цеха», предназначенная для формирования технического отчета о работе печей и цеха в целом за заданные периоды работы печей и цеха;
- «Сопоставление отчетных показателей работы доменных печей и цеха», которая обеспечивает возможность сравнения показателей работы цеха или печи по комплексу выбранных параметров за заданный временной период;
- «Модельная поддержка принятия решений, прогнозирование технологических ситуаций и диагностика работы доменных печей». В основу реализации подсистемы положены алгоритмы расчета с использованием математических моделей доменного процесса для выбранного пользователем периода работы отдельных печей или цеха в целом [1, 2]. Анализ доменного процесса позволяет констатировать, что эта подсистема должна включать следующие взаимосвязанные подсистемы более низкого уровня декомпозиции:

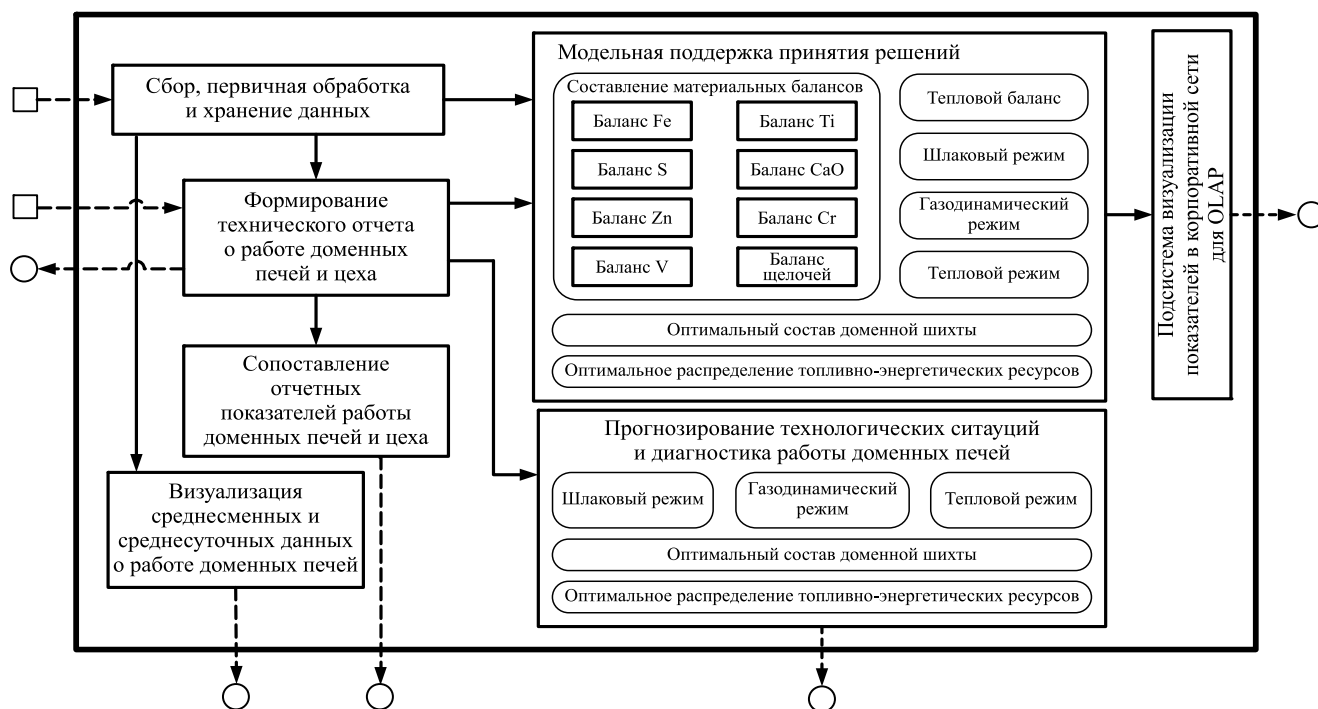


Рис. 1. Структура автоматизированной информационной системы анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха (АИС АППС ДЦ):

□ – источник данных; ○ – представление данных

Fig. 1. Structure of management information system for the analysis and forecasting of industrial situations of blast-furnace shop:

□ – a source of data; ○ – data presentation

составление материальных балансов и теплового баланса доменной плавки; шлакового режима; газодинамического режима; теплового режима; оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов; оптимального выбора состава доменной шихты, а также диагностики хода доменной плавки. Каждая из этих подсистем взаимодействует с другими блоками параметров, подсистемами и внешней средой.

- «Визуализация показателей работы доменного производства для OLAP» обеспечивает уполномоченным пользователям доступ ко всей отчетной информации по доменному производству в корпоративной сети предприятия.

В ходе проектирования системы потребовалась детальная проработка функциональности отдельных подсистем. С этой целью разработана обобщенная функциональная модель, в основу которой положены идеи и нотации методики структурного анализа и проектирования IDEF0 [6]. Реализация выполнена в программе AllFusion Process Modeler (BPwin). Использование этой методики позволило создать функциональные блоки отдельных подсистем, выявить производимые ими действия и связи между этими действиями, управляющие воздействия и механизмы выполнения каждой функции. Общее количество декомпозированных блоков функциональной модели АИС АППС ДЦ составляет 152. Декомпозиция модели выполнена до третьего уровня включительно.

На основе анализа требований технологического персонала, нормативно-справочной информации доменного производства и функционального моделирования разработано математическое и алгоритмическое обеспечение, которое положено в основу программной реализации подсистемы отображения данных о работе отдельных доменных печей и цеха в целом. Структурный системный анализ и проектирование блоков математических моделей выполнены на основе процедурно-ориентированного подхода. Основой данного подхода является использование диаграмм потоков данных (DFD, Data Flow Diagrams) – информационной модели, основными компонентами которой являются потоки данных, переносящие информацию от одного модуля к другому [6]. Нотация метода DFD предполагает разбиение математической модели на отдельные функциональные компоненты (процессы) и представление их в виде сети, связанной потоками данных.

Программная реализация информационно-моделирующего комплекса «Автоматизированное рабочее место (АРМ) технолога доменного цеха» выполнена в среде Microsoft Visual Studio (язык программирования C#) [7]. На рис. 2 продемонстрирована архитектура программного обеспечения комплекса, в которой выделены основные компоненты. Центральным звеном является структура хранения данных [8], которая формируется на сервере базы данных информацион-

но-вычислительного центра доменного производства. Источниками ее наполнения являются аппаратно-программное обеспечение АСУ доменного цеха, корпоративной информационной системы (КИС) и центральной диспетчерской комбината (ЦДК). В зависимости от требований отдельных подсистем возможно реализовать различные периоды усреднения данных в базе с помощью механизмов системы управления базами данных.

Представленная на рис. 2 архитектура обеспечивает заданную функциональность, выполнение требований предметной области, относительно простое расширение и изменение системы, возможность автономной реализации отдельных программных модулей и их независимость от структуры хранения данных. Перечень расчетных программных модулей:

- «Тепловой баланс доменной плавки» производит автоматический расчет и отображение приходных и расходных статей теплового баланса доменной плавки на основе среднемесячных отчетных данных о работе доменного цеха за указанный пользователем период;
- «Материальные балансы железа, серы, цинка, титана, СаО, хрома доменных печей» осуществляет автоматический расчет и отображение материальных балансов железа, серы, цинка, титана, СаО, хрома доменных печей на основе среднемесячных отчетных данных о работе доменного цеха за указанный пользователем период;
- «Газодинамический режим доменной плавки» производит автоматический расчет и отображение показателей газодинамического режима доменной плавки на основе среднемесячных отчетных данных о работе доменного цеха за указанный пользователем период;
- «Шлаковый режим доменной плавки» выполняет автоматический расчет и отображение показателей шлакового режима доменной плавки на основе среднемесячных отчетных данных о работе доменного цеха на основе среднемесячных отчетных данных за указанный пользователем период;
- «Выбор оптимального состава доменной шихты» позволяет решать технологические задачи выбора оптимального состава доменной шихты на основе среднемесячных отчетных данных о работе доменного цеха за указанный пользователем период;
- «Зона вязкопластичного состояния железорудных материалов доменной печи» осуществляет автоматический расчет и отображение показателей, характеризующих форму и положение зоны вязкопластичного состояния железорудных материалов доменной печи на основе среднемесячных отчетных данных о работе доменного цеха за указанный пользователем период;

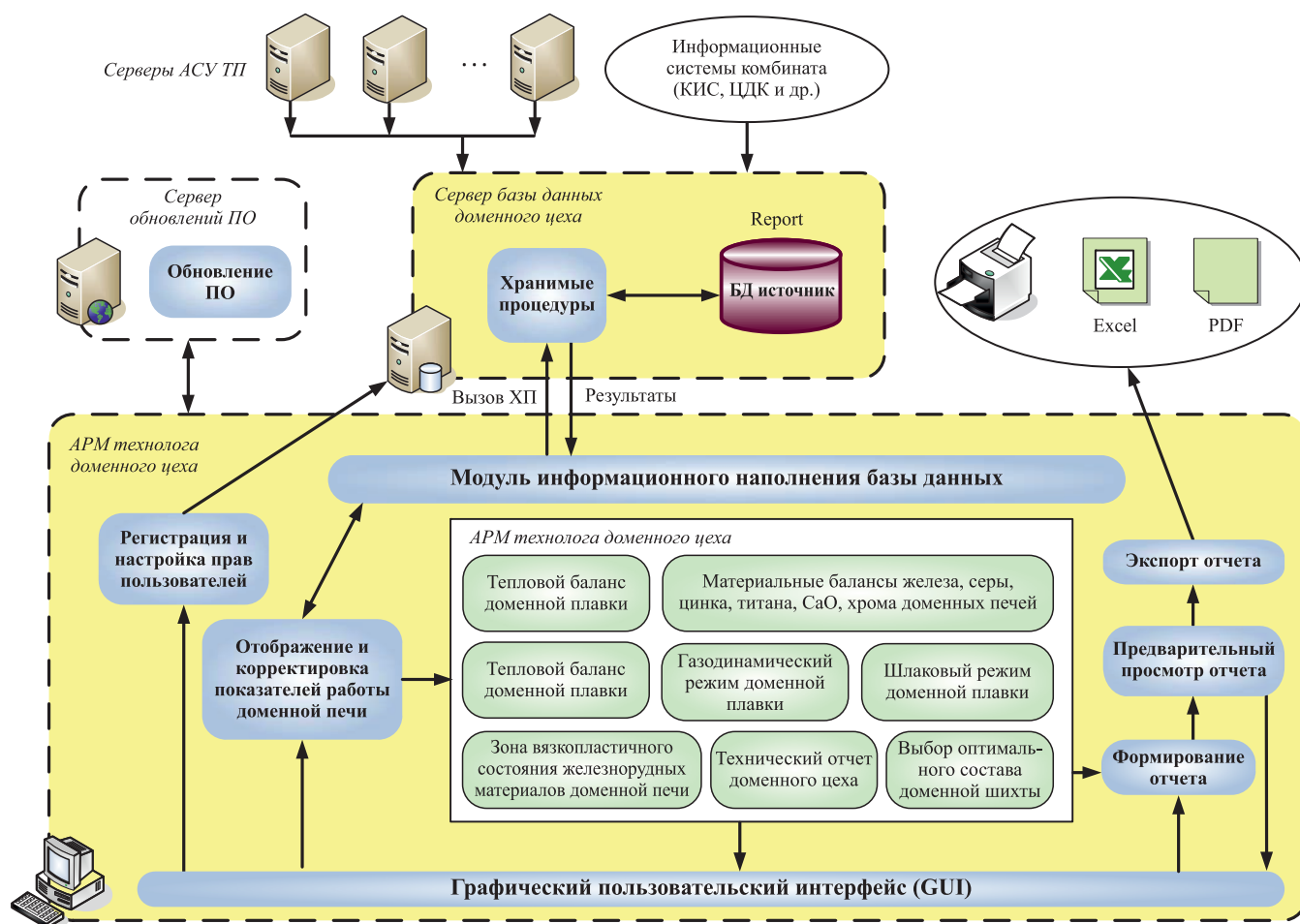


Рис. 2. Архитектура программного комплекса «Автоматизированное рабочее место технолога доменного цеха»

Fig. 2. Architecture of a program complex «Automated workplace of the blast furnace plant technologist»

- «Технический отчет доменного цеха» производит отображение показателей технического отчета доменного цеха за календарный месяц, а также с начала года до указанного пользователем месяца.

Программное обеспечение предназначено для инженерно-технологического персонала, входит в состав автоматизированной информационной системы анализа и прогнозирования доменного цеха ОАО «ММК».

Интегрированный программный комплекс выполнен в виде отдельного клиентского приложения, установленного на компьютер пользователя путем установки загрузочного файла. Исходными данными для работы являются среднемесячные отчетные данные о работе доменного цеха. При этом программа осуществляет автоматическое извлечение среднемесячных отчетных показателей о работе доменных печей и цеха за указанный пользователем период работы и расчет комплекса параметров, характеризующих технологические режимы доменной плавки. В качестве источника отчетных данных выступает централизованная база данных АСУ доменного цеха. Комплекс имеет широкий выбор интерактивных настроек для

удобства восприятия и минимизации рутинных действий пользователя. Результаты модельных отчетов представляются в табличной и графической пользовательских формах, предусмотрено формирование отчета с возможностью его предварительного просмотра и экспорта в другие форматы.

После регистрации пользователя в программе и загрузки главной формы на экране будут отражены отчетные данные для базового (фактического отчетного за календарный месяц) периода работы доменной печи, которые автоматически считываются из базы данных центра АСУ ММК за календарный месяц (рис. 3). Отображение данных на главной форме возможно для двух периодов: базового и сравнительного. Сравнительный период служит для сопоставления фактических отчетных показателей работы доменной печи с аналогичными показателями в базовом периоде за календарный месяц.

Для удобства быстрого восприятия технологической ситуации и тенденций изменения отчетных показателей работы доменной печи в базовом и сравнительном периодах пользователю предоставлена возможность отображения данных по отдельным категориям: «Режим-

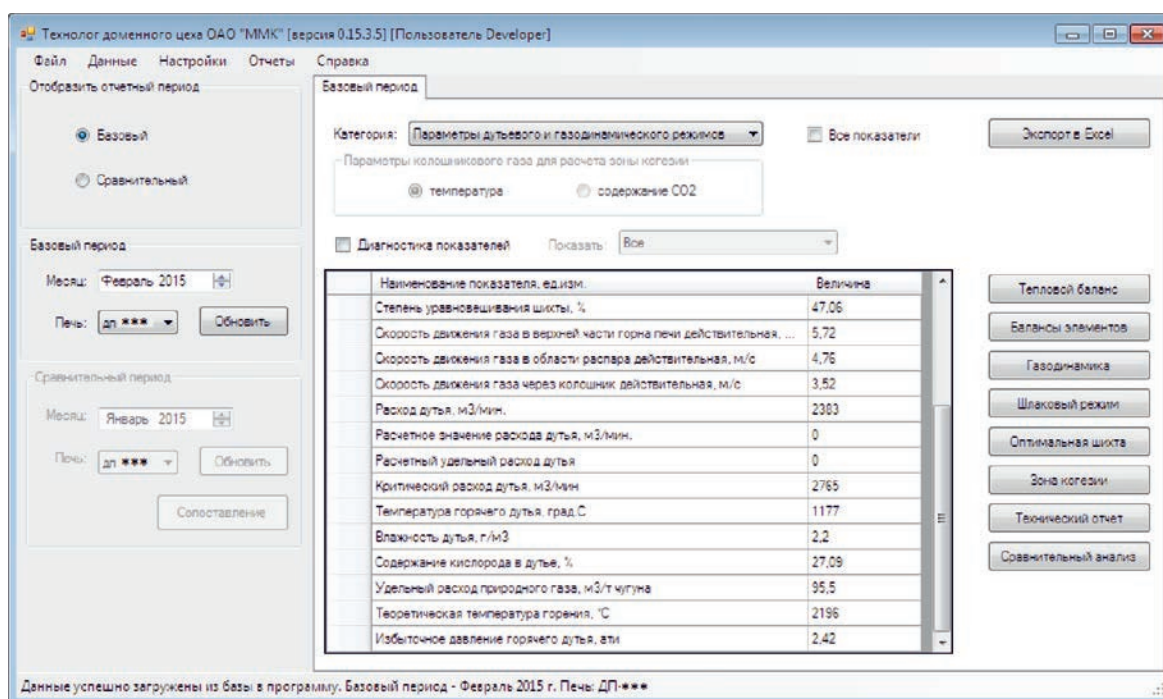


Рис. 3. Главное окно информационной системы АРМ «Технолог доменного цеха»

Fig. 3. The main window of information system of an automated workplace «The blast furnace plant technologist»

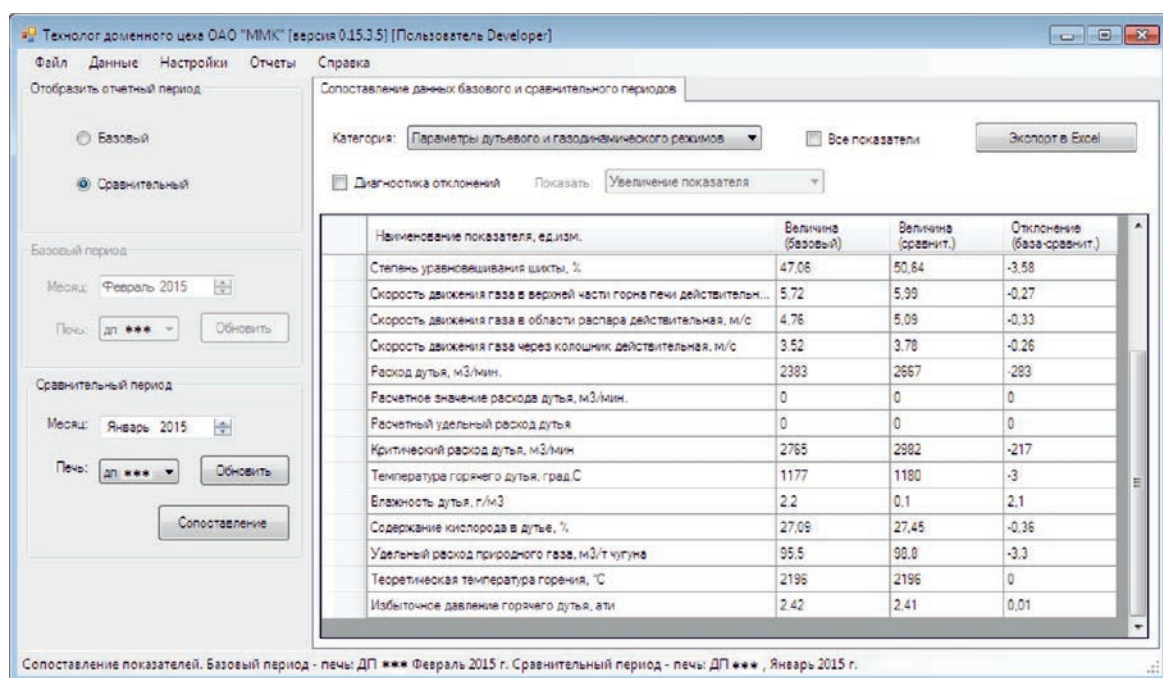


Рис. 4. Отображение сопоставления показателей базового и сравнительного периодов на форме АРМ «Технолог доменного цеха»

Fig. 4. The main view of information system of an automated workplace «The blast furnace plant technologist»

ные параметры»; «Конструктивные размеры печи»; «Характеристика кокса»; «Параметры и расход шихты»; «Дутьевые параметры»; «Колошниковый газ»; «Жидкие продукты плавки: чугун»; «Жидкие продукты плавки: шлак»; «Тепловой баланс»; «Баланс Fe»; «Баланс S»; «Баланс Zn»; «Баланс Ti»; «Баланс CaO»;

«Баланс Ст»; «Первичный шлак»; «Конечный шлак»; «Газодинамика».

После загрузки сравнительного периода пользователь с помощью кнопки «Сопоставить» может увидеть отклонения всех величин в сравнительном периоде от соответствующих показателей базового периода (рис. 4).

АРМ «Технолог доменного цеха», помимо предоставления данных для текущего анализа отчетных показателей и оценки производственных ситуаций, позволяет решать также ряд технологических задач по управлению тепловым, газодинамическим и шлаковым режимами доменной плавки, а также расчет оптимального состава доменной шихты.

В результате с использованием современной технологии разработки и программных инструментальных средств [6 – 8] создана и внедрена в опытно-промышленную эксплуатацию система анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха ОАО «ММК», которая предоставляет в распоряжение инженерно-технологического персонала современный инструмент оперативного анализа отчетных показателей работы [9, 10]. Использование разработанной системы позволяет инженерно-технологическому персоналу оперативно проводить анализ производственных ситуаций доменного цеха, решать задачи управления технологией доменной плавки, что в конечном итоге обеспечивает повышение технико-экономических показателей работы доменного производства.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки металлургии / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др. / Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 462 с.

2. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спирин, В.Л. Терентьев и др. / Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. – 301 с.
3. Feng Q., Wang L. Blast furnace hoist charging control system based on ActiveX technology // WIT Transactions on Information and Communication Technologies; Wuhan; China; 7 May 2013 through 8 May 2013. 2014. Vol. 46. V. 2. P. 1853 – 1858.
4. Dimitrov B.H., Nenov H.B., Marinov A.S. Comparative analysis between methodologies and their software realizations applied to modeling and simulation of industrial thermal processes // 36th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, MIPRO 2013; Opatija; Croatia; 20 May 2013 through 24 May 2013. Article number 6596383. P. 891 – 895.
5. Bartels R., Dohl K., Uhde H. etc. New process-control computer-system for the blast-furnace plant of an integrated iron and steel works // Stahl Und Eisen. 1994. Vol. 114. Issue 6. P. 75 – 79.
6. Одинцов И.О. Профессиональное программирование. Системный подход. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 624 с.
7. Троелсен Э. Язык программирования C# 5.0 и платформа .NET 4.5. 6-е изд. – М.: Вильямс, 2013. – 1311 с.
8. Дейт К. Дж. Введение в системы баз данных. 8-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1328 с.
9. Spirin N. A., Lavrov V. V., Burykin A. A. etc. Complex of model systems for supporting decisions made in managing blast-furnace smelting technology // Metallurgist. 2011. Vol. 54. No. 9 – 10. P. 566 – 569.
10. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП: Учеб. пособие / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др. / Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 558 с.

Поступила 10 апреля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 9, pp. 703–709.

#### DEVELOPMENT OF THE CAM SYSTEM SOFTWARE AT BLAST FURNACE PLANT

**Lavrov V.V.<sup>1</sup>**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

(v.v.lavrov@urfu.ru)

**Spirin N.A.<sup>1</sup>**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

**Burykin A.A.<sup>1</sup>**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

**Shchipanov K.A.<sup>1</sup>**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

**Rybolovlev V.Y.<sup>2</sup>**, Cand. Sci. (Eng.), Chief of Design office

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia)

<sup>2</sup> JSC “Magnitogorsk Metallurgical Plant” (93, Kirova str., Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russia)

**Abstract.** The requirements, structure and architecture of an automated workplace «The technologist of domain shop», computer system of support of decision-making of the MES-level, introduced in CAM system at blast furnace plant of OJSC «Magnitogorsk Iron and Steel Work» are considered. The short description of the basic modeling subsystems, and also the assumptions accepted in the course of mathematical modeling is presented. The use of the developed system allows the engineering-technological personnel operatively to carry out the analysis of industrial situations of blast-furnace shop, to decide a number of technological prob-

lems of management of thermal, gas dynamic and slag modes of blast-furnace smelting, and also to make calculation of optimum structure iron-ore materials, that finally provides the increase of technical and economic indicators of work of blast-furnace manufacture.

**Keywords:** blast furnace production, automated process control system for blast furnaces, MES-system, the analysis of industrial situations, the decision of technological problems.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-703-709

#### REFERENCES

1. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Krasnobaev A.V., Onorin O.P., Kosachenko I.E. *Model'nye sistemy podderzhki priinyatiya reshenii v ASU TP domennoi pлавки metallurgii* [Model support entity of decision-making in automatic process control system of blast-furnace metallurgy]. Ekaterinburg: UrFU, 2011. 462 p. (In Russ.).
2. Onorin O.P., Spirin N.A., Terent'ev V.L. etc. *Komp'yuternye metody modelirovaniya domennogo protsesssa* [Computer modeling techniques blast furnace process]. Ekaterinburg: izd. UGTU–UPI, 2005. 301 p. (In Russ.).
3. Feng Q., Wang L. Blast furnace hoist charging control system based on ActiveX technology. *WIT Transactions on Information and Communication Technologies; Wuhan; China; 7 May 2013 through 8 May 2013*. Vol. 46 V. 2, 2014, pp. 1853–1858.

4. Dimitrov B.H., Nenov H.B., Marinov A.S. Comparative analysis between methodologies and their software realizations applied to modeling and simulation of industrial thermal processes. *36th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, MIPRO 2013; Opatija; Croatia; 20 May 2013 through 24 May 2013*. Article number 6596383, pp. 891–895.
5. *New process-control computer-system for the blast-furnace plant of an integrated iron and steel works* / Bartels R., Dohl Kw., Uhde H., Schroder A., Stumpe W. *Stahl Und Eisen*. 1994. Vol. 114. Issue 6, pp. 75–79.
6. Odintsov I.O. *Professional'noe programmirovanie. Sistemnyi podkhod* [Professional programming. System approach]. St. Petersburg: BHV-Peterburg, 2004. 624 p. (In Russ.).
7. Troelsen Andrew. *Pro C# 5.0 and the .NET 4.5 framework*. 6th edition, Apress, 2012, 1560 p. (Russ.ed.: Troelsen A. *Yazyk programmirovaniya C# 5.0 i platforma .NET 4.5*. 6-e izd., per. s angl. Moscow: OOO "I.D. Vil'yams", 2013. 1311 p.).
8. Date C.J. *Introduction to Database Systems*. Addison-Wesley, 2004, 1024 p. (Russ.ed.: Date C.J. *Vvedenie v sistemy baz dannykh*. Moscow: Vil'yams, 2006. 1328 p.).
9. Spirin N. A., Lavrov V. V., Burykin A. A., Rybolovlev V. Yu., Krasnobaev A. V., Kosachenko I. E. Complex of model systems for supporting decisions made in managing blast-furnace smelting technology. *Metallurgist*, 2011, Vol. 54, no. 9–10, pp. 566–569.
10. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu. etc. *Matematicheskoe modelirovanie metallurgicheskikh protsessov v ASU TP: uchebnoe posobie* [Mathematical modeling of metallurgical processes in ACS: Manual]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: UrFU, 2014, 558 p. (In Russ.).

Received April 10, 2015

## ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИИ СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ

**Шилов В.А.**, д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением»

**Куделин С.П.**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика

в металлургии» (kudelinsp@mail.ru)

**Инамович Ю.В.**, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением»

**Бондин А.Р.**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

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

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

**Аннотация.** В Уральском федеральном университете разработана экспертная система (ЭС) для анализа и проектирования технологии сортовой прокатки, которая может быть использована при оптимизации действующих и проектировании новых технологических процессов сортовой прокатки. Для функционирования ЭС созданы базы знаний о предметной области, основанные на теоретических и экспериментальных исследованиях, а также на обобщении опыта производства сортовых профилей на действующих станах. Комплексная математическая модель расчета калибровок валков и технологических режимов прокатки, созданная на основе современных представлений о механике деформируемого тела, позволяет рассчитывать полный комплекс технологических и энергосиловых параметров моделируемого процесса. Программное обеспечение ЭС разработано для операционной системы Windows с использованием среды визуального программирования Borland C++ Builder.

**Ключевые слова:** экспертная система, база знаний, база данных, наборы правил, сортовая прокатка, калибровка валков, математическое моделирование, оптимизация.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-710-715

Решение задач автоматизированного проектирования технологических режимов прокатки возможно на основе применения методов искусственного интеллекта, одним из проявлений которого являются экспертные системы (ЭС), находящие все большее применение в различных предметных отраслях [1 – 3].

В Уральском федеральном университете (УрФУ) создана ЭС для анализа и проектирования технологии сортовой прокатки. Разработанная ЭС технологии сортовой прокатки предназначена для оперативного анализа и экспертной оценки технологических процессов прокатки сортовых профилей на станах с непрерывным и последовательным расположением рабочих клетей. При этом она позволяет решать достаточно широкий круг задач моделирования, диагностики и оптимизации действующих и проектируемых технологических процессов, а также определения параметров настройки прокатных станов при реализации рассчитанных технологических режимов.

В частности, специалисту-пользователю система предоставляет возможность:

- рассчитывать полный комплекс технологических параметров прокатки заданного профиля и проводить их экспертную оценку;
- определять влияние температуры нагрева заготовки на технологические параметры и нагруженность оборудования стана;
- моделировать влияние скоростного режима прокатки на изменение технологических параметров и условия работы прокатных клетей;
- определять влияние марки прокатываемой стали на заполнение калибров и параметры силовой загрузки оборудования;
- определять возможность прокатки заданной марки стали в условиях действующей калибровки валков прокатного стана;
- находить причины поломок оборудования рабочих клетей;
- прогнозировать точность прокатки заданного профиля на стане с заданной жесткостью рабочих клетей;
- выявлять резервы совершенствования технологии по различным показателям (повышение производительности, снижение расхода тепловой и электрической энергии, увеличение степени загрузки оборудования);
- проводить оптимизацию и рационализацию действующих и проектируемых технологических процессов по критериям быстродействия и экономии материально-энергетических ресурсов;
- определять установочные межвалковые зазоры в рабочих клетях при прокатке заданного профиля по запроектированным технологическим режимам.

Для функционирования ЭС технологии сортовой прокатки были созданы базы знаний о предметной области, основанные на теоретических и экспериментальных исследованиях, а также на обобщении опыта производства сортовых профилей на действующих станах.

Декларативные знания (характеристика прокатных станов, сортамент прокатываемых профилей, калибровки валков и режимы прокатки, требования к качеству и точности профилей и т.п.) представлены в виде пяти реляционных баз данных (БД).

Для представления процедурных (формализованных) знаний о технологических процессах сортовой прокатки допустимо использовать различные математические модели (классическую теорию прокатки и расчета крутящего момента [4], метод конечных элементов [4], генетический алгоритм расчета формоизменения [5] и др.). В ЭС применена математическая модель формоизменения и энергосиловых параметров, разработанная в УрФУ на основе использования вариационных принципов теории пластичности и статистического обобщения действующих калибровок валков [6].

Для обработки комплекса формализованных знаний с целью принятия решения использованы производственные модели.

Структурная схема ЭС технологии сортовой прокатки приведена на рис. 1. В ее состав входят 13 основных модулей.

Функционирование системы начинается с формирования исходной информации в модуле 1. При этом необходимые для решения задачи параметры вызываются из соответствующих баз данных и записываются в специальные файлы-таблицы. В разработанную ЭС включены следующие БД:

- по составу прокатных станов, работающих на отечественных металлургических заводах, и сортаменту прокатываемых на них профилей (БД «Заводы, станы, сортамент»);

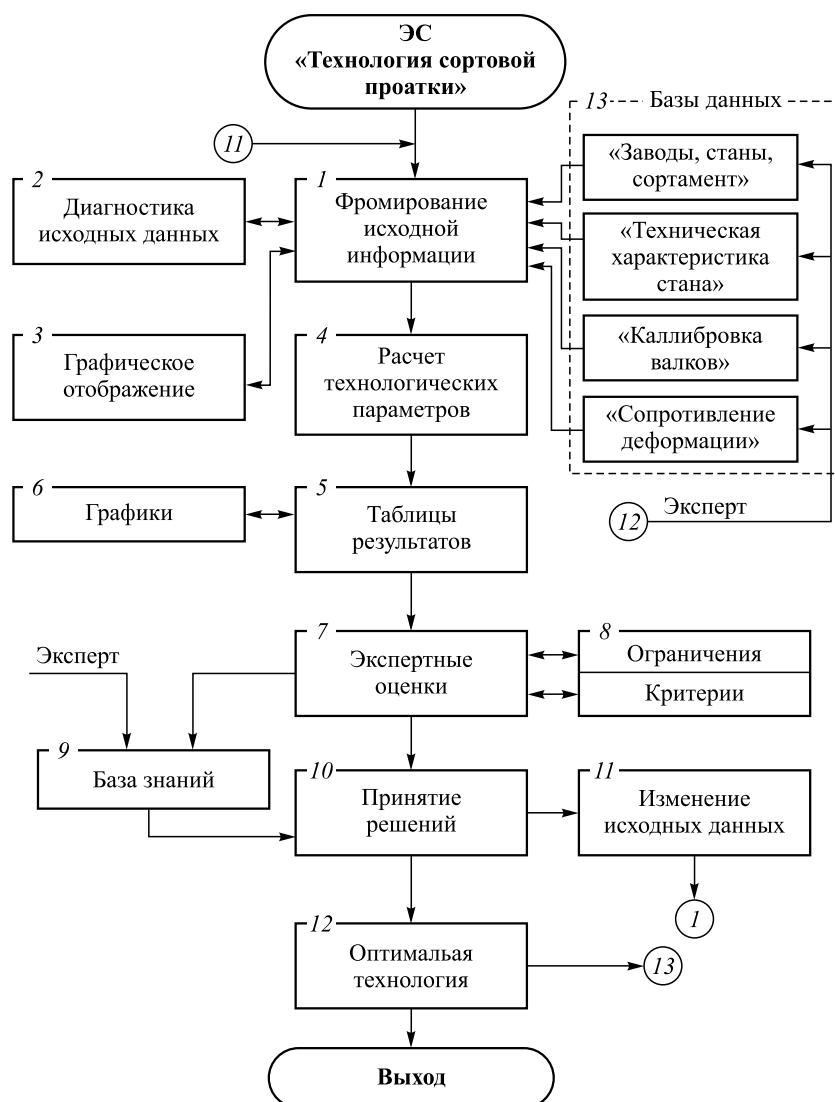


Рис. 1. Структурная схема экспертной системы технологии сортовой прокатки

Fig. 1. Structural diagram of Expert System of bar rolling technology

- по технической характеристике прокатных станов (БД «Техническая характеристика стана»);
- по калибровкам валков и режимам деформации при прокатке характерных профилей (БД «Калибровка валков»);
- по требованиям стандартов к точности прокатаемых профилей (БД «Требования к точности»);
- по коэффициентам для определения сопротивления деформации различных сталей и сплавов (БД «Сопротивление деформации»).

Если анализируемый прокатный стан технологический режим в БД отсутствуют, то информация о технической характеристике этого стана, калибровке валков и технологических режимах прокатки предварительно вводится в соответствующие БД. Таким образом, идет постепенное накопление информации в БД, что создает возможность для проектирования технологии прокатки новых профилей по аналогам.

Сформированная исходная информация подвергается диагностике на предмет выявления ошибок (модуль 2). Предусмотрено графическое изображение анализируемых или проектируемых калибров и задаваемых в них полос на экране монитора (модуль «Графическое отображение»).

На основе сформированной исходной информации в модуле 4 производится расчет полного комплекса технологических и энергосиловых параметров моделируемого процесса.

Комплексная модель расчета калибровок валков и технологических режимов прокатки позволяет рассчитывать формоизменение металла и энергосиловые параметры для любой системы калибров простой формы в зависимости от следующих безразмерных параметров, однозначно характеризующих форму и размеры очага деформации при прокатке по любой системе калибров, например, по системе овал–овал (рис. 2):

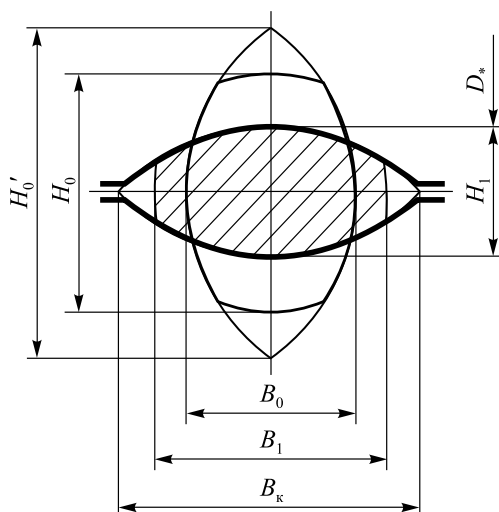


Рис. 2. Схема прокатки по системе калибров овал–овал

Fig. 2. The scheme of rolling on oval–oval caliber system

приведенный диаметр валков  $A = D^*/H_1$ ; коэффициент обжатия  $1/\eta = H_0/H_1$ ; отношение сторон задаваемого раската  $a_0 = H_0/B_0$  и калибра  $a_k = B_k/H_1$ ; степень заполнения предыдущего по ходу прокатки калибра  $\delta_0 = H_0/H'_0$ ; для ящичных калибров, кроме перечисленных параметров, выпуск ящичного калибра  $\text{tg}\varphi$ . Условия трения на контактной поверхности характеризуются показателем трения  $\psi = \tau/\tau_s$ , определяемым в зависимости от температуры металла и схемы прокатки ( $\tau$  – напряжения трения,  $\tau_s$  – предел текучести металла на сдвиг).

С учетом данных параметров рассчитывают следующие характеристики формоизменения металла:

- коэффициент уширения

$$\beta = 1 + C_0 \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right)^{C_1} A^{C_2} a_0^{C_3} a_k^{C_4} \delta_0^{C_5} \psi^{C_6} \text{tg}\varphi^{C_7} \times \left[ 1 + 0,6 \left( \frac{\sigma_{s_i}}{\sigma_{s_6}} - 1 \right)^{0,544} \right];$$

- ширину полосы  $B_1 = B_0\beta$ ;
- степень заполнения калибра  $\delta_1 = B_1/B_k$ ;
- площадь поперечного сечения раската

$$\omega_1 = H_1^2 f(\delta_1, a_k, \text{tg}\varphi);$$

- коэффициент вытяжки  $\lambda_1 = \omega_0/\omega_1$ ,

где  $C_0, C_1, C_2, \dots, C_7$  – коэффициенты, принимающие численные значения в зависимости от схемы прокатки;  $\sigma_{s_i}$  и  $\sigma_{s_6}$  – сопротивление деформации прокатываемой ( $\sigma_{s_i}$ ) и базовой низкоуглеродистой стали (Ст3), определяемое по методу термомеханических коэффициентов А.А. Третьякова-В.И. Зюзина, Л.В. Андреюка-Г.Г. Тюленева или каким-либо другим методом [7, 8].

Энергосиловые параметры рассчитывают по формулам:

- среднее контактное давление  $p = 1,15 n_\sigma \sigma_s$ ;
- сила прокатки  $P = pF$ ;
- крутящий момент деформации  $M_{\text{вал}} = 0,287 \sigma_s H_1^3 \times A^2 n_{\text{вал}}$ ;
- мощность прокатки  $N_{\text{пр}} = 2 M_{\text{вал}} H_1 U / A$ ,

где  $n_\sigma$  – коэффициент напряженного состояния, учитывающий влияние контактного трения и жестких концов;  $F$  – контактная площадь;  $n_{\text{вал}}$  – коэффициент мощности прокатки;  $U$  – скорость прокатки. Коэффициенты  $n_\sigma$ ,  $n_{\text{вал}}$  и контактную площадь определяют в зависимости от схемы прокатки по формулам, имеющим общую структуру следующего функционального вида:

$$n_\sigma = f_1 \left( \frac{l}{H_{\text{cp}}}, a_k, A, a_0, \psi \right); n_{\text{вал}} = f_2 (\lambda, A, \psi);$$

$$F = H_1^2 f_3 \left( \frac{1}{\eta}, A, a_0, a_k, \delta_0 \right).$$

Для схем прокатки, включающих калибры, форма которых отличается от обычных размеров калибров простой формы, система расчетов предусматривает определение энергосиловых параметров, при этом фасонные калибры и раскаты заменяются соответственными прямоугольными.

Скорости прокатки  $U_i$  в каждой  $i$ -ой клетке непрерывного и последовательного стана рассчитываются с учетом условия постоянства секундных объемов:  $U_i = u_{i-1} \lambda_i$ . Одновременно рассчитываются минимально и максимально допустимые скорости прокатки  $U_{\min i}$  и  $U_{\max i}$  в зависимости от предельной частоты вращения и катающего диаметра валков каждой клетки.

Для расчета температуры раската по проходам в системе предусмотрены две математические модели:

- с учетом потерь тепла за счет лучеиспускания и разогрева металла от деформации (две статьи теплового баланса);
- с учетом потерь тепла за счет лучеиспускания, конвекции, теплопроводности и разогрева металла от деформации (четыре статьи теплового баланса).

В результате расчетов формируются таблицы расчетных данных (модуль «Таблицы результатов»). Предусмотрена возможность представления расчетных параметров в виде графиков их изменения по проходам. С этой целью в состав системы включен модуль «Графики».

Полученная расчетная информация подвергается экспертной оценке с проверкой всех ограничений, рассчитываются критерии качества проектируемого процесса (модули 7 и 8).

В ЭС предусмотрены следующие ограничения режимов прокатки в каждом  $i$ -ом проходе:

- по степени заполнения калибров металлом  $0,6 \leq \delta_{li} \leq 1,0$ ;
- по условиям захвата металла валками  $\alpha_i < [\alpha]$ ;
- по условиям устойчивости полос в калибрах  $[a]_{\min} < a_{li} < [a]_{\max}$ ;
- по прочности оборудования рабочих клеток  $R_i < P_{\text{доп } i}$ ,  $M_{\text{пр } i} < M_{\text{доп } i}$ ;
- по степени загрузки электродвигателей привода клеток (с учетом его типа)  $k_{\text{дв } i} = (M_i / M_{\text{дв } i}) < 1$  или  $N_{\text{пр } i} < N_{\text{дв } i}$ ;
- по скоростному режиму работы стана  $U_{\min i} < U_i < U_{\max i}$ ;
- по производительности нагревательной печи  $\Pi_j < \Pi_{\Pi}$ ,

где  $R_i$  и  $M_{\text{пр } i}$  – реакция силы прокатки на шейку валка и крутящий момент прокатки и их допустимые значения  $P_{\text{доп } i}$  и  $M_{\text{доп } i}$ ;  $k_{\text{дв } i}$  – коэффициент загрузки электродвигателя привода клетки;  $M_i$ ,  $M_{\text{дв } i}$  – крутящий момент, приведенный к валу двигателя, и момент, развиваемый электродвигателем;  $N_{\text{пр } i}$  и  $N_{\text{дв } i}$  – мощность прокатки и мощность электродвигателя;  $\alpha_i$ ,  $[\alpha]$  – расчетный и максимально допустимый угол захвата металла валками;  $a_i$ ,

$[a]_{\min}$  и  $[a]_{\max}$  – расчетное, минимально и максимально допустимое по устойчивости отношение осей раскатов неравноосных поперечных сечений;  $\Pi_j$  и  $\Pi_{\Pi}$  – производительность стана при прокатке  $j$ -го профилеразмера и производительность нагревательной печи.

Для оценки качества и оптимизации анализируемых и проектируемых технологических процессов в системе предусмотрено использование следующих критериев:

- производительность прокатного стана, рассчитываемая в зависимости от такта  $T_{\text{т}}$  или конечной скорости прокатки  $U_{\text{к}}$ ;
- расход электроэнергии на прокатку  $W_3$ ;
- расход топлива  $W_{\text{т}}$ , контролируемый по температуре нагрева металла  $t_0$ ;
- степень заполнения калибров  $\delta_1$ , влияющая на качество формоизменения металла;
- степень нагруженности оборудования рабочих клеток стана:

$$k_p = \frac{P_{\text{доп}}}{R_{\text{max}}}, k_m = \frac{M_{\text{доп}}}{M_{\text{max}}}, k_{\text{дв}} = \frac{N_{\text{н}}}{N_{\text{дв}}}.$$

Результаты оценки системы ограничений приводятся к безразмерному виду и формируются в виде алфавита (см. таблицу).

Продукционные модели базы знаний (модуль 9) содержат набор правил, обобщающих опыт специалистов-экспертов по улучшению качества технологических процессов. Знания хранятся с использованием таблиц целей, выводов, правил, условий и фактов (рис. 3).

В зависимости от решаемой задачи (поставленной цели) предусмотрено несколько наборов (таблиц) правил, представляющих собой цепочку логических рассуждений, основанных на применении продукций вида [2, 3] «ЕСЛИ... ТО» (условие  $P$  действие). В указанной конструкции правил между условием и действием располагаются факты, в качестве которых используются полученные расчетные данные и их экспертные оценки (см. таблицу).

Например:

«ЕСЛИ  $\alpha_i / [\alpha] > 1,05$ , ТО необходимо уменьшить коэффициент обжатия  $1/\eta$ »;

«ЕСЛИ степень загрузки электродвигателя  $k_{\text{дв}}$  равна или меньше 0,4, ТО рекомендуется увеличить коэффициент вытяжки  $\lambda$ »;

«ЕСЛИ  $k_p > 1$ , ТО возможна поломка оборудования клетки, необходимо перераспределить обжатия» и т.п.

Наряду с этим используются правила типа AUBUA&B и преобразования Де Моргана [3].

Применяя соответствующий набор правил последовательно для каждого прохода, система определяет резервы улучшения технологического процесса и формирует в модуле 10 (Машине вывода) решение по изменению режима деформации металла, выдавая его в виде сообщения на экран монитора. Пользователю предоставляется возможность согласиться с этим ре-

# Экспертная оценка режима прокатки в каждой $i$ -ой клетки прокатного стана ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ )

## Expert estimation of regime in each $i$ rolling mill stand ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ )

| Параметр          | Резерв       |           | Корректировка |           | Большая перегрузка |
|-------------------|--------------|-----------|---------------|-----------|--------------------|
|                   | значительный | небольшой | оптимальная   | небольшая |                    |
|                   | уровень 1    | уровень 2 | уровень 3     | уровень 4 |                    |
| $\alpha/[\alpha]$ | 0,3          | 0,8       | 1,0           | 1,05      | 1,10               |
| $U/U_{\max}$      | 0,5          | 0,8       | 0,95          | 1,10      | 1,20               |
| $a_1/[a]_{\max}$  | 0,5          | 0,8       | 1,0           | 1,05      | 1,15               |
| $k_p$             | 0,4          | 0,7       | 1,0           | 1,1       | 1,15               |
| $k_m$             | 0,4          | 0,7       | 1,0           | 1,1       | 1,15               |
| $k_{\text{дв}}$   | 0,4          | 0,7       | 1,0           | 1,1       | 1,15               |

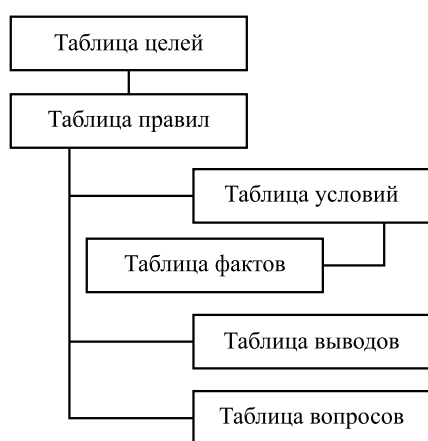


Рис. 3. Иерархия таблиц знаний

Fig. 3. The hierarchy of knowledge tables

шением или внести в него коррективы, изменить соответствующим образом исходные данные и произвести повторные расчеты. Путем такого диалога с компьютером пользователь добивается получения оптимального решения поставленной задачи. Параметры рассчитанного технологического процесса заносят в БД с целью накопления информации.

Программное обеспечение описанной ЭС разработано для операционной системы Windows с использованием среды визуального программирования Borland C++ Builder [9], БД основаны на использовании таблиц Paradox.

Указанные программные и технические средства обеспечивают достаточно простой и удобный интерфейс пользователя с компьютером посредством раскрывающихся на экране монитора окон, меню, списков, полей ввода, кнопок и т.п.

Программный комплекс «Экспертная система технологии сортовой прокатки» зарегистрирован в РОСПАТЕНТе [10].

**Выводы.** Разработана ЭС технологии сортовой прокатки, которая может быть использована в научно-исследовательских институтах и на металлургических заводах при совершенствовании действующих и проектировании новых технологических процессов сортовой прокатки.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Джексон П. Введение в экспертные системы: Учеб. пособие. – М.: Вильямс, 2001. – 624 с.
2. Егоров Н.В., Карпов А.Г. Диагностические информационно-экспертные системы. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2002. – 470 с.
3. Ручкин В.Н., Фулин В.А. Универсальный искусственный интеллект и экспертные системы. – СПб.: BHV-Санкт-Петербург, 2009. – 240 с.
4. Oduguwa V., Roy R. A Review of Rolling System Design Optimisation //International Journal of Machine Tools and Manufacture. June 2006. Vol. 46. Issues 7 – 8. P. 912 – 928. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/1023/4/Review\\_Rolling\\_System\\_Design\\_Optimisation\\_2006.pdf](https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/1023/4/Review_Rolling_System_Design_Optimisation_2006.pdf)
5. Huang B., Xing K., Abhary K., Spuzic S. Optimization of oval-round passdesign using genetic algorithm // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. August 2012. Vol. 28. Issue 4. P. 493 – 499. [Электронныйресурс]. Режим доступа: [http://www.researchgate.net/publication/257242312\\_Optimization\\_of\\_ovalround\\_pass\\_design\\_using\\_genetic\\_algorithm](http://www.researchgate.net/publication/257242312_Optimization_of_ovalround_pass_design_using_genetic_algorithm)
6. Смирнов В.К., Шилов В.А., Игнатович Ю.В. Калибровка прокатных валков. – М.: Теплотехник, 2010. – 490 с.
7. Зюзин В.И., Третьяков А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением: Справочник. – Челябинск: Металл, 2000. – 368 с.
8. Никитин Г.С. Теория непрерывной продольной прокатки. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 399 с.
9. Шилдт Г. Теория и практика C++. – СПб: BHV-Санкт-Петербург, 2001. – 412 с.
10. Программный комплекс «Экспертная система технологии сортовой прокатки» / С.П. Куделин, В.К. Смирнов, В.А. Шилов, Ю.В. Игнатович // Свидетельство № 2001610602 от 25 мая 2001 г.

Поступила 10 апреля 2015 г.

## EXPERT SYSTEM OF BAR ROLLING TECHNOLOGY

**Shilov V.A.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metal Forming”

**Kudelin S.P.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”  
(kudelinsp@mail.ru)

**Inatovich Yu.V.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Metal Forming”

**Bondin A.R.**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

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

**Abstract.** The Expert System (ES) was developed at the Ural Federal University for the analysis and design of bar rolling technologies and it can be used in the optimization of existing and design of new processes of bar rolling. For the operation of the ES a knowledge base was created about the subject area, based on theoretical and experimental studies, as well as generalizations of experience in the production of rolled bars at existing mills. A comprehensive mathematical model of calculation of rolling passes and technological rolling, created on the basis of modern ideas about the mechanics of deformable bodies, allows the calculation of a full range of technological and energy-power parameters of the simulated process. The ES software was developed for operational system Windows using the visual programming environment of Borland C++ Builder.

**Keywords:** Expert System, knowledge base, database, rule sets, rolling bar, rolling passes, mathematical modeling, optimization.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-9-710-715

## REFERENCES

1. Jackson Peter. *Introduction to Expert Systems*. Addison-Wesley; 3rd Ed, 1998, 560 p. (Russ.ed.: Jackson P. *Vvedenie v ekspertnye sistemy: Ucheb. posobie*. Moscow: Vil'yams, 2001. 624 p.).
2. Egorov N.V., Karpov A.G. *Diagnosticheskie informatsionno-ekspertnye sistemy* [Diagnostic information and expert systems]. St. Petersburg: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2002. 470 p. (In Russ.).
3. Ruchkin V.N., Fulin V.A. *Universal'nyi iskusstvennyi intellekt i ekspertnye sistemy* [Universal artificial intelligence and Expert Systems]. St. Petersburg: BHV-Sankt-Peterburg, 2009. 240 p. (In Russ.).
4. Oduguwa V., Roy R. A Review of Rolling System Design Optimisation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. June 2006, Vol. 46, Issues 7–8, pp. 912–928. Available at URL: [https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/1023/4/Review\\_Rolling\\_System\\_Design\\_Optimisation\\_2006.pdf](https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/1023/4/Review_Rolling_System_Design_Optimisation_2006.pdf)
5. Huang B., Xing K., Abhary K., Spuzic S.. Optimization of oval-round pass design using genetic algorithm. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. August 2012, Vol. 28, Issue 4, pp. 493–499. Available at URL: [http://www.researchgate.net/publication/257242312\\_Optimization\\_of\\_ovalround\\_pass\\_design\\_using\\_genetic\\_algorithm](http://www.researchgate.net/publication/257242312_Optimization_of_ovalround_pass_design_using_genetic_algorithm)
6. Smirnov V.K., Shilov V.A., Inatovich Yu.V. *Kalibrovka prokatnykh valkov* [Calibration of rolls]. Moscow: Teplotekhnika, 2010. 490 p. (In Russ.).
7. Zyuzin V.I., Tret'yakov A.V. *Mekhanicheskie svoystva metallov i spлавov pri obrabotke davleniem: Spravochnik* [The mechanical properties of metals and alloys under pressure treatment: A Reference book]. Chelyabinsk: Metall, 2000. 368 p. (In Russ.).
8. Nikitin G.S. *Teoriya nepreryvnoi prodol'noi prokatki* [The theory of continuous longitudinal rolling]. Moscow: MGTU im. N. E. Bauman, 2009. 399 p. (In Russ.).
9. Schildt Herbert. *Teoriya i praktika C++* [Theory and practice of C++]. SPb: BHV-Sankt-Peterburg, 2001. 412 p. (In Russ.).
10. Kudelin S.P., Smirnov V.K., Shilov V.A., Inatovich Yu.V. *Programmy kompleks "Ekspertnaya sistema tekhnologii sortovoi prokatki"* [Program complex "Expert System for bar rolling technology"]. Certificate of authorship no. 2001610602, May 25, 2001. (In Russ.).

Received April 10, 2015

Над номером работали:

Юсфин Ю.С., 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 6.10.2015. Формат 60×90 1/8. Бум. офсетная № 1.  
Печать цифровая. Усл. печ. л. 13,0. Заказ 4718. Цена свободная.

---

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСиС.  
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4.  
Тел./факс: (499) 236-76-17, 236-76-35