

# ИЗВЕСТИЯ

## ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 64 Номер 8 2021



### ◦ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

**ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ ВОДОРОДА В ЦИРКУЛЯЦИОННОМ ВАКУУМАТОРЕ В УСЛОВИЯХ КЦ-2 ПАО «НЛМК»**

**ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОКАТКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ**

### ◦ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

**ПРЯМОЕ МИКРОЛЕГИРОВАНИЕ СТАЛИ ЦЕРИЕМ ПОД ШЛАКАМИ СИСТЕМЫ  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-15 \% Al}_2\text{O}_3\text{-8 \% MgO}$  ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ВОССТАНОВИТЕЛЯМИ**

### ◦ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

**ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ НА ПАРАМЕТРЫ СУБСТРУКТУРЫ И ПОЛЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ ЛИНИИ СПЛАВЛЕНИЯ**



ISSN 0368-0797 (Print)  
ISSN 2410-2091 (Online)

# ИЗВЕСТИЯ

## ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

*Том 64, Номер 8, 2021*

Научно-технический журнал  
Издается с января 1958 г. ежемесячно

# IZVESTIYA

## FERROUS METALLURGY

*Volume 64, Number 8, 2021*

Scientific and Technical Journal  
Published since January 1958. Issued monthly

Москва / Moscow, 2021

# ИЗВЕСТИЯ

## ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

www.fermet.misis.ru

ISSN 0368-0797 (Print) ISSN 2410-2091 (Online)

### Варианты названия:

Известия вузов. Черная металлургия  
Izvestiya. Ferrous Metallurgy

### Учредители:



Национальный исследовательский  
технологический университет «МИСиС» (НИТУ МИСиС)



Сибирский государственный индустриальный университет

### Главный редактор:

**Леопольд Игоревич Леонтьев**, академик РАН, советник, Президиум РАН; д.т.н., профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»; главный научный сотрудник, Институт металлургии УрО РАН, г. Москва

### Заместитель главного редактора:

**Евгений Валентинович Протопопов**, д.т.н., профессор, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

### Адреса редакций:

Россия, 119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 4  
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,  
Тел.: +7 (495) 638-44-11  
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@misis.ru

Россия, 654007, Новокузнецк,  
Кемеровская обл. – Кузбасс, ул. Кирова, зд. 42  
Сибирский государственный индустриальный университет,  
Тел.: +7 (3843) 74-86-28  
E-mail: redjizvz@sibsiiu.ru

### Редакционная коллегия:

**Алешин Н.П.**, д.т.н., профессор, академик РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

**Астахов М.В.**, д.т.н., профессор, НИТУ «МИСиС», г. Москва

**Ашихмин Г.В.**, д.т.н., профессор, ОАО «Ин-т Цветметобработка», г. Москва

**Байсанов С.О.**, д.т.н., профессор, ХМИ им. Ж.Абишева, г. Караганда, Республика Казахстан

**Белов В.Д.**, д.т.н., профессор, НИТУ «МИСиС», г. Москва

**Бродов А.А.**, к.экон.н., ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва

**Волынкина Е.П.**, д.т.н., профессор, СибГИУ, г. Новокузнецк

**Глезер А.М.**, д.ф.-м.н., профессор, НИТУ «МИСиС», г. Москва

**Горбатов С.М.**, д.т.н., профессор, НИТУ «МИСиС», г. Москва

**Григорович К.В.**, академик РАН, д.т.н., ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва

**Громов В.Е.**, д.ф.-м.н., профессор, СибГИУ, г. Новокузнецк

**Дмитриев А.Н.**, д.т.н., академик, профессор, ИМЕТ УрО РАН, г. Екатеринбург

**Дуб А.В.**, д.т.н., профессор, ЗАО «Наука и инновации», г. Москва

**Жучков В.И.**, д.т.н., профессор, ИМЕТ УрО РАН, г. Екатеринбург

**Зингер Р.Ф.**, д.т.н., профессор, Институт Фридриха-Александра, Германия

**Зиниград М.**, д.т.н., профессор, Институт Ариэля, Израиль

**Золотухин В.И.**, д.т.н., профессор, ТулГУ, г. Тула

**Колмаков А.Г.**, д.т.н., чл.-корр. РАН, ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва

**Колокольцев В.М.**, д.т.н., профессор, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск

**Костина М.В.**, д.т.н., ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва

**Косырев К.Л.**, д.т.н., профессор, АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва

**Курганова Ю.А.**, д.т.н., профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва

**Курносов В.В.**, к.ф.-м.н., доцент, НИТУ «МИСиС», г. Москва

**Линн Х.**, ООО «Линн Хай Терм», Германия

**Лысак В.И.**, д.т.н., профессор, ВолгГТУ, г. Волгоград

**Мешалкин В.П.**, д.т.н., профессор, академик РАН, РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва

**Мулюков Р.Р.**, д.ф.м.-н., профессор, чл.-корр. ФГБУН ИПСМ РАН, г. Уфа

**Мышляев Л.П.**, д.т.н., профессор, СибГИУ, г. Новокузнецк

**Никулин С.А.**, д.т.н., профессор, чл.-корр. РАЕН, НИТУ «МИСиС», г. Москва

**Нурумалиев А.Х.**, д.т.н., профессор, КГИУ, г. Караганда, Республика Казахстан

**Островский О.И.**, д.т.н., профессор, Университет Нового Южного Уэльса, Сидней, Австралия

**Пиетрелли Лорис**, д.т.н., Итальянское национальное агентство по новым технологиям, энергетике и устойчивому экономическому развитию, Рим, Италия

**Подгородецкий Г.С.**, к.т.н., доцент, НИТУ «МИСиС», г. Москва

**Пышминцев И.Ю.**, д.т.н., РосНИТИ, г. Челябинск

**Рудской А.И.**, д.т.н., профессор, СПбПУ Петра Великого, г. Санкт-Петербург

**Сивак Б.А.**, к.т.н., профессор, АО АХК «ВНИИМЕТМАШ», г. Москва

**Симомян Л.М.**, д.т.н., профессор, НИТУ «МИСиС», г. Москва

**Смирнов Л.А.**, д.т.н., профессор, академик, РАН ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург

**Солодов С.В.**, к.т.н., НИТУ «МИСиС», г. Москва

**Спирин Н.А.**, д.т.н., профессор, УрФУ, г. Екатеринбург

**Танг Гуоци**, Институт перспективных материалов университета Циньхуа, г. Шеньжень, Китай

**Темлянец М.В.**, д.т.н., профессор, СибГИУ, г. Новокузнецк

**Филонов М.Р.**, д.т.н., профессор, НИТУ «МИСиС», г. Москва

**Чуманов И.В.**, д.т.н., профессор, ЮУрГУ, г. Челябинск

**Шецуков О.Ю.**, д.т.н., профессор, УрФУ, г. Екатеринбург

**Шпайдель М.О.**, д.ест.н., профессор, Швейцарская академия материаловедения, Швейцария

**Юрьев А.Б.**, д.т.н., доцент, СибГИУ, г. Новокузнецк

**Юсупов В.С.**, д.т.н., профессор, ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва

По решению ВАК журнал «Известия вузов. Черная металлургия» 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».

**Индексирование:** Scopus, Russian Science Citation Index на платформе Web of Science, Research Bible, OCLC и Google Scholar

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций ПИ № ФС77-35456.



Статьи доступны под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

# IZVESTIYA

## FERROUS METALLURGY

www.fermet.misis.ru

ISSN 0368-0797 (Print) ISSN 2410-2091 (Online)

### Alternative title:

Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya  
Izvestiya. Ferrous Metallurgy

### Founders:



National University of Science  
and Technology "MISIS"



Siberian State Industrial University

### Editor-in-Chief:

**Leopold I. Leont'ev**, Academician, Adviser of the Russian Academy of Sciences; Dr. Sci. (Eng.), Prof., National University of Science and Technology "MISIS"; Chief Researcher, Institute of Metallurgy UB RAS, Moscow

### Deputy Editor-in-Chief:

**Evgenii V. Protopopov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

### Editorial Addresses:

4 Leninskii Ave., Moscow 119991, Russian Federation  
National University of Science and Technology "MISIS"  
Tel.: +7 (495) 638-44-11  
E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@sisu.ru

42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass  
654007, Russian Federation  
Siberian State Industrial University  
Tel.: +7 (3843) 74-86-28  
E-mail: redjizvz@sibsiu.ru

### Editorial Board:

**Nikolai P. Aleshin**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician of RAS, Bauman STU, Moscow  
**German V. Ashikhmin**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., JSC "Institute Tsvetmetobrabotka", Moscow

**Mikhail V. Astakhov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST "MISIS", Moscow

**Sailaubai O. Baisanov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Republic of Kazakhstan

**Vladimir D. Belov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST "MISIS", Moscow

**Anatolii A. Brodov**, Cand. Sci. (Econ.), Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy, Moscow

**Ilya V. Chumanov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., South Ural State Research University, Chelyabinsk

**Andrei N. Dmitriev**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician, Institute of Metallurgy, Ural Branch of RAS, Ural Federal University, Yekaterinburg

**Aleksei V. Dub**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., JSC "Science and Innovations", Moscow

**Mikhail R. Filonov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST "MISIS", Moscow

**Aleksandr M. Glezer**, Dr. Sci. (Phys.-math.), Prof., NUST "MISIS", Moscow

**Sergei M. Gorbatyuk**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST "MISIS", Moscow

**Konstantin V. Grigorovich**, Academician of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow

**Victor E. Gromov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

**Aleksei G. Kolmakov**, Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member of RAS, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow

**Valerii M. Kolokol'tsev**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk

**Mariya V. Kostina**, Dr. Sci. (Eng.), Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow

**Konstantin L. Kosyrev**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., JSC "NPO "TSNIITMash", Moscow

**Yuliya A. Kurganova**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Bauman Moscow State Technical University, Moscow

**Vladimir V. Kurnosov**, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assist. Prof., NUST "MISIS", Moscow

**Linn Horst**, Linn High Therm GmbH, Hirschbach, Germany

**Vladimir I. Lysak**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, Volgograd State Technical University, Volgograd

**Valerii P. Meshalkin**, Dr. Sci. (Eng.), Academician of RAS, Prof., D.I. Mendeleev Russian Chemical-Technological University, Moscow

**Radik R. Mulyukov**, Dr. Sci. (Phys.-Chem.), Prof., Corresponding Member of RAS, Institute of Metals Superplasticity Problems of RAS, Ufa

**Leonid P. Myshlyayev**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

**Sergei A. Nikulin**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member of RANS, NUST "MISIS", Moscow

**Asylbek Kh. Nurumgaliev**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Karaganda State Industrial University, Karaganda, Republic of Kazakhstan

**Oleg I. Ostrovski**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., University of New South Wales, Sidney, Australia

**Loris Pietrelli**, Dr., Scientist, Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development, Rome, Italy

**Gennadii S. Podgorodetskii**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., NUST "MISIS", Moscow

**Igor' Yu. Pyshmintsev**, Dr. Sci. (Eng.), Russian Research Institute of the Pipe Industry, Chelyabinsk

**Andrei I. Rudskoi**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg

**Oleg Yu. Sheshukov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Ural Federal University, Yekaterinburg

**Laura M. Simonyan**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST "MISIS", Moscow

**Robert F. Singer**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Friedrich-Alexander University, Germany

**Boris A. Sivak**, Cand. Sci. (Eng.), Prof., VNIIMETMASH Holding Company, Moscow

**Leonid A. Smirnov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician of RAS, OJSC "Ural Institute of Metals", Yekaterinburg

**Sergei V. Solodov**, Cand. Sci. (Eng.), NUST "MISIS", Moscow

**Speidel Marcus**, Dr. Natur. Sci., Prof., Swiss Academy of Materials, Switzerland

**Nikolai A. Spirin**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Ural Federal University, Yekaterinburg

**Tang Guoi**, Institute of Advanced Materials of Tsinghua University, Shenzhen, China

**Mikhail V. Temlyantsev**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

**Ekaterina P. Volynkina**, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

**Aleksei B. Yur'ev**, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

**Vladimir S. Yusupov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow

**Vladimir I. Zhuchkov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute of Metallurgy, Ural Branch of RAS, Ural Federal University, Yekaterinburg

**Michael Zinigrad**, Dr. Sci. (Physical Chemistry), Prof., Rector, Ariel University, Israel

**Vladimir I. Zolotukhin**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Tula State University, Tula

*Journal "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.*

**Indexed:** Scopus, Russian Science Citation Index (Web of Science), Research Bible, OCLC and Google Scholar

Registered in Federal Service for Supervision in the Sphere of Mass Communications **PI number FS77-35456.**



Articles are available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Плешивцев К.Н., Шешуков О.Ю., Метелкин А.А., Шевченко О.И. Изучение процесса удаления водорода в циркуляционном вакууматоре в условиях КЦ-2 ПАО «НЛМК» ..... 543
- Уманский А.А., Юр'ев А.Б., Дорوفеев В.В., Думова Л.В. Исследования напряженно-деформированного состояния металла на начальной стадии прокатки железнодорожных рельсов ..... 550

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ  
ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

- ГлушакOVA О.В., Черникова О.П. Влияние предприятий черной металлургии на качество атмосферного воздуха как экологической составляющей устойчивого развития территорий. Сообщение 2 ..... 561

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Смирнов А.Н., Попова Н.А., Абабков Н.В., Князьков К.В., Никоненко Е.Л. Влияние степени деформации сварных соединений аустенитных сталей на параметры субструктуры и поля внутренних напряжений в зоне линии сплавления ..... 572

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Уполовникова А.Г., Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Михайлова Л.Ю. Прямое микролегирование стали церием под шлаками системы  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-15 \% Al}_2\text{O}_3\text{-8 \% MgO}$  дополнительными восстановителями ..... 581

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

- Спирин Н.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю., Шнайдер Д.А., Краснобаев А.В., Гурин И.А. Цифровая трансформация пирометаллургических технологий: состояние, научные проблемы и перспективы развития ..... 588

В ПОРЯДКЕ ДИСКУССИИ

- Громов В.Е., Рубанникова Ю.А., Коновалов С.В., Осинцев К.А., Воробьев С.В. Формирование улучшенных механических свойств высокоэнтропийного сплава Cantor ..... 599

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

- Кадьков В.Н., Мусатова А.И., Койнов Р.С. Разработка комплекса нормативных моделей функционирования подразделений металлургического предприятия ..... 606
- К юбилею Валерия Павловича Мешалкина ..... 611

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- Pleshivtsev K.N., Sheshukov O.Yu., Metelkin A.A., Shevchenko O.I. Hydrogen removal in circulating vacuum degasser under conditions of PJSC "NLMK" ..... 543
- Umanskii A.A., Yur'ev A.B., Dorofeev V.V., Dumova L.V. Stress-strain state of metal at the initial stage of railway rails rolling ..... 550

ECOLOGY AND RATIONAL USE  
OF NATURAL RESOURCES

- Glushakova O.V., Chernikova O.P. Influence of ferrous metallurgy enterprises on atmospheric air quality as an ecological component of territories sustainable development. Report 2 ..... 561

MATERIAL SCIENCE

- Smirnov A.N., Popova N.A., Ababkov N.V., Knyaz'kov K.V., Nikonenko E.L. Influence of deformation degree of austenitic steels welded joints on structural state and internal stresses fields in weld line zone ..... 572

PHYSICO-CHEMICAL BASICS  
OF METALLURGICAL PROCESSES

- Upolovnikova A.G., Babenko A.A., Smirnov L.A., Mikhailova L.Yu. Direct microalloying of steel with cerium under slags of  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-15 \% Al}_2\text{O}_3\text{-8 \% MgO}$  system with additional reducing agents ..... 581

INFORMATION TECHNOLOGIES  
AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

- Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Shnaider D.A., Krasnobayev A.V., Gurin I.A. Digital transformation of pyrometallurgical technologies: State, scientific problems and prospects of development ..... 588

IN THE ORDER OF DISCUSSION

- Gromov V.E., Rubannikova Yu.A., Konovalov S.V., Osintsev K.A., Vorob'ev S.V. Generation of increased mechanical properties of Cantor high-entropy alloy ..... 599

ECONOMIC EFFICIENCY  
OF METALLURGICAL PRODUCTION

- Kadykov V. N., Musatova A. I., Koinov R.S. Development of a set of regulatory models for metallurgical enterprise divisions functioning ..... 606
- To the 80<sup>th</sup> Anniversary of Valerii Pavlovich Meshalkin ..... 611



Оригинальная статья

УДК 519:669.27

DOI 10.17073/0368-0797-2021-8-543-549



## ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ ВОДОРОДА В ЦИРКУЛЯЦИОННОМ ВАКУУМАТОРЕ В УСЛОВИЯХ КЦ-2 ПАО «НЛМК»

К. Н. Плешивцев<sup>1</sup>, О. Ю. Шешуков<sup>2,3</sup>, А. А. Метелкин<sup>4</sup>, О. И. Шевченко<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (Россия, 398040, Липецк, пл. Металлургов, 2)

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

<sup>3</sup> Институт металлургии УрО РАН (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 28)

<sup>4</sup> Нижнетагильский институт (филиал) Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 622031, Свердловская обл., Нижний Тагил, Красногвардейская ул., 59)

**Аннотация.** Для выплавки высококачественной стали необходимо поэтапное производство в металлургических агрегатах, способных к выпуску продукции с высокими эксплуатационными свойствами и низким содержанием вредных примесей. Одной из вредных примесей является водород и важно ограничить его содержание в металле. Для обеспечения заданного содержания водорода металл на участке внепечной обработки стали КЦ-2 ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» подвергают обработке вакуумом в установке циркуляционного вакуумирования. Несмотря на распространенность циркуляционных вакууматоров, теоретически механизм удаления водорода в этих металлургических агрегатах изучен недостаточно. Для повышения эффективности удаления водорода проведены теоретические расчеты по удалению его из металла. Существует несколько механизмов удаления водорода: непосредственный переход водорода из металла в окружающее пространство; образование пузырей газа в металле и их непосредственное всплытие; зарождение пузырей водорода на границе огнеупорной кладки с металлом; удаление водорода при продувке металла нейтральным газом (аргоном). Показано, что основными путями удаления водорода в установке циркуляционного вакуумирования являются непосредственный переход водорода из металла в окружающее пространство и продувка расплава транспортирующим газом. В конвертерном цехе № 2 ПАО «НЛМК» на установке циркуляционного вакуумирования реализуются оба пути. Вакуумные насосы обеспечивают давление в вакуум-камере менее 101,3 Па (0,001 атм.). Это способствует интенсивному удалению водорода с поверхности металла. Для обеспечения циркуляции металла во впускной патрубке установки RH подается транспортирующий газ аргон, который также принимает участие в удалении растворенных газов путем перехода водорода в пузырьки нейтрального газа. Дополнительно проведенные расчеты показали, что основной путь дегазации в условиях КЦ-2 ПАО «НЛМК» – это удаление водорода в пузырьки транспортирующего газа.

**Ключевые слова:** удаление водорода, циркуляционный вакууматор, внепечная обработка стали, дегазация

**Для цитирования:** Плешивцев К.Н., Шешуков О.Ю., Метелкин А.А., Шевченко О.И. Изучение процесса удаления водорода в циркуляционном вакууматоре в условиях КЦ-2 ПАО «НЛМК» // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 8. С. 543–549.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-543-549>

Original article

## HYDROGEN REMOVAL IN CIRCULATING VACUUM DEGASSER UNDER CONDITIONS OF PJSC “NLMK”

K. N. Pleshivtsev<sup>1</sup>, O. Yu. Sheshukov<sup>2,3</sup>, A. A. Metelkin<sup>4</sup>, O. I. Shevchenko<sup>4</sup>

<sup>1</sup> PJSC “Novolipetsk Metallurgical Plant” (2 Metallurgov Sqr., Lipetsk 398040, Russian Federation)

<sup>2</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

<sup>3</sup> Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (28 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

<sup>4</sup> Nizhny Tagil Institute (Branch) of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (59 Krasnogvardeyskaya Str., Nizhny Tagil, Sverdlovsk Region 622031, Russian Federation)

**Abstract.** For high-quality steel smelting, stage-by-stage production is required, which has a complex of metallurgical units capable for producing products with high performance properties and low content of harmful impurities. One of the harmful impurities is hydrogen, so it is important to limit its content in the metal. To ensure the specified hydrogen content, the metal in the steel out-of-furnace treatment at Converter Shop No. 2 (CS-2) of PJSC “Novolipetsk Metallurgical Plant” (“NLMK”) is subjected to vacuum treatment in a circulating vacuum degasser. Despite the prevalence of circulating vacuum derassers, theoretically, mechanism of hydrogen removal in these metallurgical units has been insufficiently studied. To increase efficiency of hydrogen removal, theoretical calculations were performed to remove it from the metal. There are several mechanisms for hydrogen

removing: direct transfer of hydrogen from metal to the surrounding space; formation of gas bubbles in metal and their direct ascent; nucleation of hydrogen bubbles at the border of refractory wall and metal; removal of hydrogen by metal blowing with neutral gas (argon). It is shown that the main ways of hydrogen removal in a circulating vacuum degasser are direct transfer of hydrogen from metal to the surrounding space and blowing of melt with transporting gas. In the CS-2 of PJSC “NLMK”, both ways are implemented at a circulating vacuum degasser. Vacuum pumps provide pressure in a vacuum chamber of less than 101.3 Pa (0.001 atm.). It promotes intensive removal of hydrogen from the metal surface. To ensure circulation of metal, transporting gas argon is supplied to the inlet pipe of the RH degasser, which also takes part in removal of dissolved gases by transferring hydrogen to neutral gas bubbles. Additionally, performed calculations have shown that the main way of degassing in conditions of CS-2 of PJSC “NLMK” is removal of hydrogen into the bubbles of carrier gas.

**Keywords:** hydrogen removal, circulating vacuum degasser, out-of-furnace steel treatment, degassing

**For citation:** Pleshivtsev K.N., Sheshukov O.Yu., Metelkin A.A., Shevchenko O.I. Hydrogen removal in circulating vacuum degasser under conditions of PJSC “NLMK”. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 8, pp. 543–549. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-543-549>

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время современным металлургическим предприятиям необходимо решать задачи по выпуску качественной и конкурентоспособной продукции. Для выплавки высококачественной стали необходимо поэтапное производство – комплекс металлургических агрегатов [1, 2]. На каждом из этапов решается задача рафинирования металла, а также его подготовка к разливке.

Водород является вредной примесью, снижающей эксплуатационные свойства изделий [3–9], поэтому важно ограничить его содержание в металле не более 2 ppm [10, 11].

Для обеспечения заданного содержания водорода металл на участке внепечной обработки стали КЦ-2 ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» его подвергают обработке вакуумом в установке циркуляционного вакуумирования.

Несмотря на распространенность циркуляционных вакууматоров, теоретически механизм удаления водорода в этих металлургических агрегатах изучен недостаточно [1, 12–14].

Известно, что удаление газов возможно по следующим механизмам [12–14]: *I* путь – непосредственный переход водорода из металла в окружающее пространство; *II* путь – образование пузырей газа в металле и их непосредственное всплытие; *III* путь – зарождение пузырей водорода на границе огнеупорной кладки с металлом; *IV* путь – удаление водорода при продувке металла нейтральным газом (аргоном).

Варианты удаления газов из стали представлены на рис. 1.

В исследованиях, представленных в работах [10–12], было показано, что основными путями для удаления газов (водорода) являются *I* и *IV*, то есть непосредственный переход водорода из металла в окружающее пространство и продувка расплава нейтральным газом.

В вакууматоре циркуляционного типа реализуются оба пути. Например, в КЦ-2 ПАО «НЛМК» вакуумные насосы обеспечивают давление в вакуум-камере менее 0,001 атм. (101,3 Па), что способствует интенсивному удалению водорода с поверхности металла. Дополни-

тельно для обеспечения циркуляции металла во впускной патрубке установки *RH* подается транспортирующий газ (аргон), который также принимает участие в удалении растворенных газов путем перехода водорода в пузырьки нейтрального газа. Пути удаления водорода показаны на рис. 2.

Несмотря на давность (1959 г.) разработки процесса циркуляционного вакуумирования [12] и достигаемые пределы удаления водорода [13, 15–17], до конца не выявлено, какой из представленных механизмов является преобладающим.

## ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

Целью настоящей работы является определение основных путей удаления водорода из металла в условиях КЦ-2 ПАО «НЛМК».

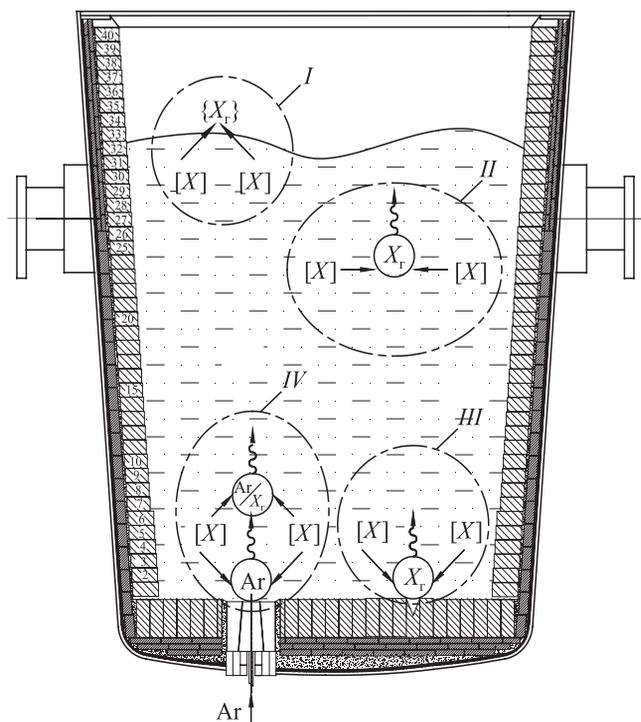


Рис. 1. Пути удаления водорода из металла

Fig. 1. Ways of hydrogen removal from the metal

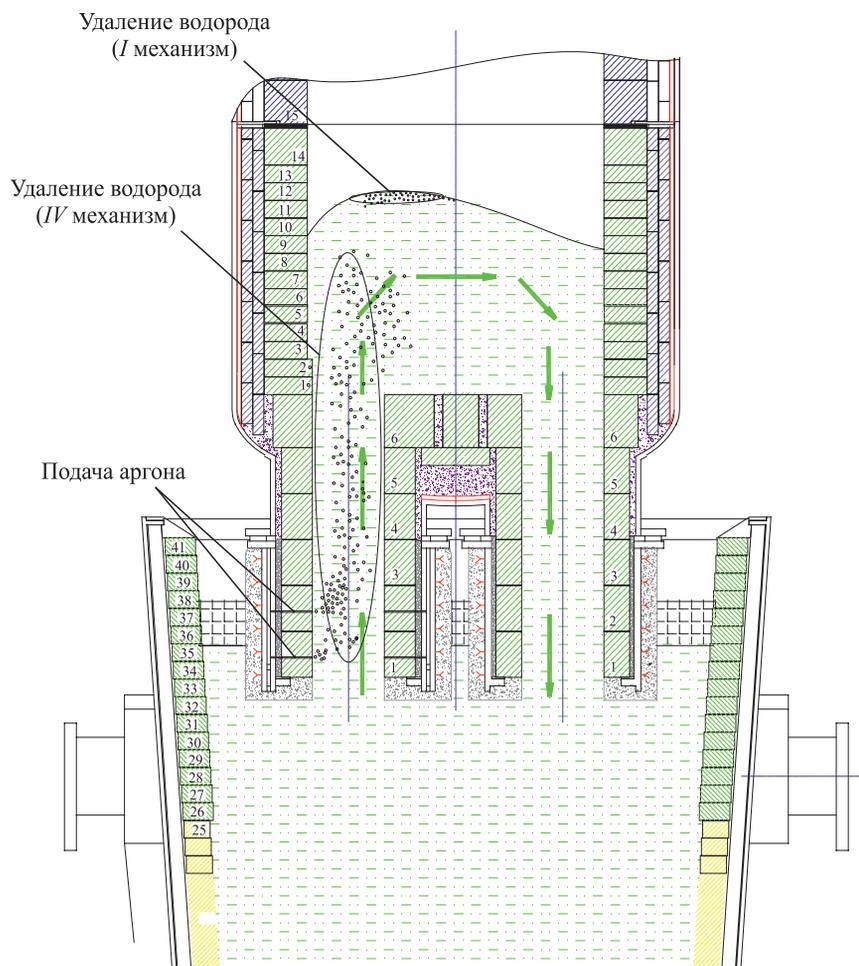


Рис. 2. Пути удаления водорода в вакуум-камере

Fig. 2. Ways to hydrogen removal in vacuum chamber

Скорость удаления водорода в циркуляционном вакууматоре [6, 11] описывается следующим уравнением:

$$[H]_t = ([H]_0 - [H]_P)10^{-0,227n} + [H]_P, \quad (1)$$

где  $[H]_t$  – конечное содержание водорода через время  $t$ ;  $[H]_P = 0,64$  ppm – равновесное содержание водорода при  $P = 0,07$  кПа (остаточное давление в вакуум-камере);  $[H]_0$  – начальное содержание водорода до обработки;  $\eta = \frac{Qt}{M}$  – кратность циркуляции;  $Q$  – количество металла, поступающего в вакуум-камеру (скорость циркуляции), т/мин;  $M$  – масса металла в сталеразливочном ковше, т.

Известно, что скорость удаления водорода зависит от скорости массопереноса металла во впускном патрубке вакуум-камеры. В работах [18 – 24] представлены различные эмпирические формулы, по которым рассчитывают скорость расплава во впускном патрубке в зависимости от различных технологических и конструктивных параметров металлургического агрегата. Наиболее удовлетворительно скорость металла

во впускном патрубке циркуляционного вакууматора описывается уравнением, выведенным японскими учеными [25].

Представленное уравнение (1) учитывает различные технологические и конструктивные параметры циркуляционного вакууматора за счет коэффициента  $\eta$  кратности циркуляции.

Графически выражение (1) представлено на рис. 3 при начальном содержании водорода в металле 6 ppm.

Удаление водорода в циркуляционном вакууматоре [12] описывается уравнением

$$\frac{c_E^{(t)} - c_P}{c_E^{(0)} - c_P} = e^{-\beta t}, \quad (2)$$

где  $c_E^{(0)}$  и  $c_E^{(t)}$  – концентрация газа в металле, втекающем в вакуум-камеру в начальный момент времени и  $t$ ;  $c_P$  – равновесная концентрация газа в металле в вакуум-камере.

Тогда конечное содержание  $c_E^{(t)}$  водорода будет равно

$$c_E^{(t)} = c_P + (c_E^{(0)} - c_P)e^{-\beta t}; \quad (3)$$

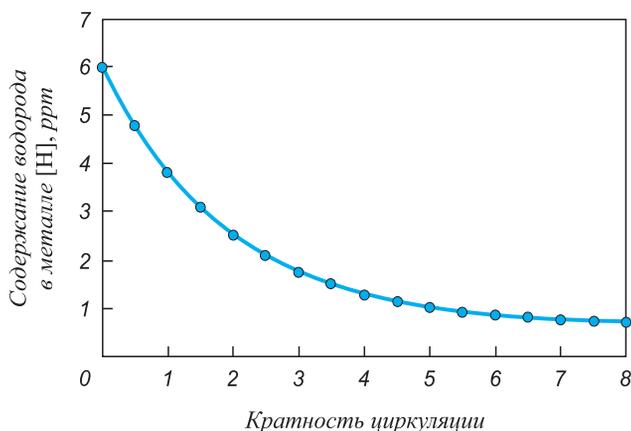


Рис. 3. Общее удаление водорода с поверхности металла за счет всплывающих пузырьков нейтрального газа

Fig. 3. Total hydrogen removal from the metal surface due to floating bubbles of neutral gas

$$\beta = \left[ \left( \frac{V}{V^*} - 1 \right) \left( \frac{V^*}{\dot{V}} + \frac{V^*}{\kappa^* F^*} \right) \right]^{-1}, \quad (4)$$

где  $V$  – объем металла в сталеразливочном ковше;  $V^*$  и  $\dot{V}$  – объем металла, находящегося в вакуум-камере и протекающего в единицу времени через вакуум-камеру;  $\kappa^*$  – коэффициент массопереноса;  $F^*$  – поверхность дегазации порций металла.

По данным работы [12] соотношение  $\frac{V^*}{\kappa^* F^*}$  соответствует значению  $0,1 \text{ C}^{-1}$ .

Если принять, что  $\dot{V}$  – объем металла, протекающего в единицу времени, будет соответствовать объему металла, из которого удаляется водород с поверхности расплава в единицу времени, то получим уравнение удаления водорода с поверхности металла в единицу времени.

Для определения поверхностного объема металла в вакуум-камере, из которого происходит удаление водорода, необходимо знать глубину зарождения пузырьков газа. Если площадь поверхности постоянна и составляет  $5,2 \text{ м}^2$  для условий агрегата циркуляционного вакуумирования ПАО «НЛМК», то глубина зарождения пузырьков газа зависит от концентрации водорода в металле и определяется уравнением [1, 12, 26]:

$$h = 142 \left( \frac{[H]^2}{738,87} - P \right); \quad (5)$$

здесь  $P$  – давление в вакуум-камере, атм.;  $H$  – концентрация водорода в металле в единицу времени, ppm.

В условиях промышленного вакуумирования достигаются давления  $P$  менее  $0,001$  атм., что обеспечивает удаление водорода с поверхности расплава при его концентрации в стали не менее  $3,5$  ppm.

Используя уравнения (2), (4) и (5), можно определить количество удаляемого водорода с поверхности металла. Расчетные данные представлены на рис. 4, кривая 1.

Дополнительно необходимо рассмотреть вопрос о возможном пределе удаления водорода по первому пути, то есть удаления с поверхности металла.

По данным работы [13] минимальному давлению насыщения, при котором способны образовываться пузырьки водорода на поверхности металла, соответствуют концентрации водорода в расплаве, определяемые по следующему уравнению:

$$[H] = K_{H_2} \sqrt{P_{\text{нас}_{\min}}}, \quad (7)$$

где  $K_{H_2} = 28,55 \text{ см}^3/100 \text{ г}$  – константа растворимости водорода в железе при температуре  $1600 \text{ }^\circ\text{C}$  [1];  $P_{\text{нас}_{\min}}$  – минимальное давление насыщения, Па.

Соответственно при давлениях насыщения меньше величины  $P_{\text{нас}_{\min}}$  устойчивые, способные к росту газовые пузырьки не зарождаются. Из работы [7] этот параметр определяется по формуле

$$P_{\text{нас}_{\min}} = P + 4\sqrt{\sigma\rho g}, \quad (8)$$

#### Общее удаление водорода и удаление водорода с поверхности расплава в зависимости от кратности циркуляции металла ( $\eta$ ) в циркуляционном вакууматоре

##### Total hydrogen removal and hydrogen removal from the melt surface, depending on the rate of metal circulation ( $\eta$ ) in circulating vacuum degasser

| $\eta$ | Общее удаление водорода, ppm | Удаление водорода с поверхности расплава, ppm |
|--------|------------------------------|---|
| 0      | 6,00                         | 6,00  |
| 0,5    | 4,77                         | 5,56  |
| 1,0    | 3,82                         | 5,20  |
| 1,5    | 3,09                         | 4,89  |
| 2,0    | 2,52                         | 4,63  |
| 2,5    | 2,09                         | 4,41  |
| 3,0    | 1,76                         | 4,22  |
| 3,5    | 1,50                         | 4,05  |
| 4,0    | 1,30                         | 3,91  |
| 4,5    | 1,15                         | 3,78  |
| 5,0    | 1,03                         | 3,66  |
| 5,5    | 0,94                         | 3,56  |
| 6,0    | 0,87                         | 3,50  |
| 6,5    | 0,82                         | 3,50  |
| 7,0    | 0,78                         | 3,50  |
| 7,5    | 0,75                         | 3,50  |
| 8,0    | 0,72                         | 3,50  |

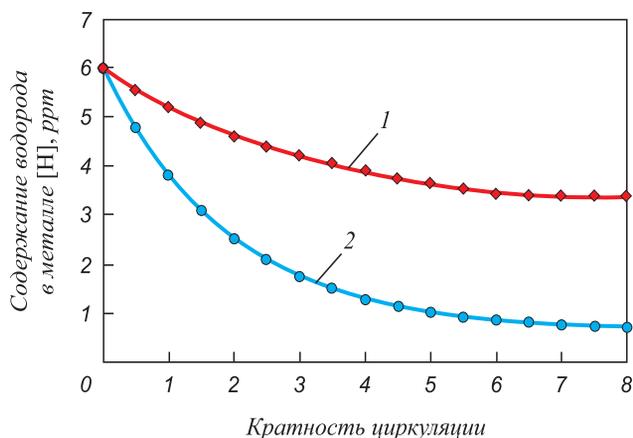


Рис. 4. Удаление водорода с поверхности расплава (1) и общее удаление водорода (2) в зависимости от кратности циркуляции металла в циркуляционном вакууматоре

Fig. 4. Hydrogen removal from the melt surface (1) and total hydrogen removal (2) depending on the rate of metal circulation in circulating vacuum degasser

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение металла, кДж/м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность стали, г/см<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, см/с<sup>2</sup>.

Для условий работы ПАО «НЛМК» и по данным работ [1, 27] этот показатель будет соответствовать 1539 Па.

Минимальное содержание водорода в стали, удаление которого возможно путем зарождения с поверхности металла, будет соответствовать значению 3,5 ppm. При содержании водорода менее 3,5 ppm его удаление возможно только по пути взаимодействия с пузырьками транспортирующего газа.

Объединяя расчетные показатели общего удаления водорода из металла и показатели удаления водорода путем образования пузырьков на поверхности расплава с пределом удаления по рассматриваемому пути, получим значения, представленные в таблице и на рис 4.

### Выводы

Удаление водорода с поверхности расплава не является основным механизмом дегазации. При концентрации водорода в стали менее 3,5 ppm образование пузырьков водорода с поверхности металла прекращается. Основной путь дегазации в условиях КЦ-2 ПАО «НЛМК» – это удаление водорода в пузырьки транспортирующего газа.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### REFERENCES

1. Бигеев А.М. Бигеев В.А. *Металлургия стали. Теория и технология плавки стали*. Магнитогорск: МГТУ, 2000. 544 с.
2. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. *Производство стали. Т. 3. Внепечная металлургия стали*. М.: Теплотехник, 2008. 544 с.
3. Шаповалов В.И., Трофименко В.В. *Флокены и контроль водорода в стали*. М.: Металлургия, 1987. 160 с.
4. Ardelean E., Hepuț T., Vătășescu M., Crișan E. Researches regarding the influence of vacuum parameters on the efficiency of gas removal from the liquid steel // *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 254. P. 218–223. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.254.218>
5. Socalici A., Popa E., Hepuț T., Drăgoi F. Researches regarding the improvement of the steel quality // *Solid State Phenomena*. 2014. Vol. 216. P. 273–278. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.216.273>
6. Yu S., Miettinen J., Louhenkilpi S. Numerical study on the removal of hydrogen and nitrogen from the melt of medium carbon steel in vacuum tank degasser // *Materials Science Forum*. 2013. Vol. 762. P. 253–260. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.762.253>
7. Steneholm K., Andersson M., Tilliander A., Jönsson P.G. Removal of hydrogen, nitrogen and sulphur from tool steel during vacuum degassing // *Ironmaking & Steelmaking*. 2013. Vol. 40. No. 3. P. 199–205. <https://doi.org/10.1179/1743281212Y.0000000029>
8. Fábíán E.R., Dévényi L. Hydrogen in the plastic deformed steel // *Materials Science Forum*. 2007. Vol. 537-538. P. 33–40. <https://doi.org/10.4028/0-87849-426-x.33>
9. Barannikova S.A., Lunev A.G., Nadezhkin M.V., Zuev L.B. Effect of hydrogen on plastic strain localization of construction steels // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 880. P. 42–47. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.880.42>
10. Морозов А.Н. *Водород и азот в стали*. М.: Металлургия, 1968. 283 с.
11. Ефимов С.В. Технологические аспекты удаления водорода с использованием установки ковшевого вакуумирования стали.
1. Bigeev A.M., Bigeev V.A. *Metallurgy of Steel. Theory and Technology of Steel Smelting*. Magnitogorsk: MSTU, 2000, 544 p. (In Russ.).
2. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V. *Production of Steel. Vol. 3. Out-of-Furnace Metallurgy of Steel*. Moscow: Teplotekhnika, 2008, 544 p. (In Russ.).
3. Shapovalov V.I., Trofimenko V.V. *Flakes and Hydrogen Control in Steel*. Moscow: Metallurgiya, 1987, 160 p. (In Russ.).
4. Ardelean E., Hepuț T., Vătășescu M., Crișan E. Researches regarding the influence of vacuum parameters on the efficiency of gas removal from the liquid steel. *Solid State Phenomena*. 2016, vol. 254, pp. 218–223. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.254.218>
5. Socalici A., Popa E., Hepuț T., Drăgoi F. Researches regarding the improvement of the steel quality. *Solid State Phenomena*. 2014, vol. 216, pp. 273–278. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.216.273>
6. Yu S., Miettinen J., Louhenkilpi S. Numerical study on the removal of hydrogen and nitrogen from the melt of medium carbon steel in vacuum tank degasser. *Materials Science Forum*. 2013, vol. 762, pp. 253–260. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.762.253>
7. Steneholm K., Andersson M., Tilliander A., Jönsson P.G. Removal of hydrogen, nitrogen and sulphur from tool steel during vacuum degassing. *Ironmaking & Steelmaking*. 2013, vol. 40, no. 3, pp. 199–205. <https://doi.org/10.1179/1743281212Y.0000000029>
8. Fábíán E.R., Dévényi L. Hydrogen in the plastic deformed steel. *Materials Science Forum*. 2007, vol. 537-538, pp. 33–40. <https://doi.org/10.4028/0-87849-426-x.33>
9. Barannikova S.A., Lunev A.G., Nadezhkin M.V., Zuev L.B. Effect of hydrogen on plastic strain localization of construction steels. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 880, pp. 42–47. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.880.42>
10. Morozov A.N. *Hydrogen and Nitrogen in Steel*. Moscow: Metallurgiya, 1968, 283 p. (In Russ.).
11. Efimov S.V. Technological aspects of hydrogen removal using a ladle vacuum degasser for steel. In: *Converter Steelmaking. Coll.*

- В кн.: Конвертерное производство стали. Сб. науч. тр. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. С. 203–207.
12. Кнүппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Основы и технология ковшовой металлургии / Пер. с нем. М.: Металлургия, 1984. 414 с.
  13. Кнүппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Термодинамические и кинетические закономерности / Пер. с нем. М.: Металлургия, 1973. 312 с.
  14. Метелкин А.А., Шешуков О.Ю., Некрасов И.В., Шевченко О.И., Корогодский А.Ю. К вопросу удаления водорода из металла в вакууматоре циркуляционного типа // Теория и технология металлургического производства. 2016. № 1 (18). С. 29–33.
  15. Селиванов В.Н., Буданов Б.А., Аланкин Д.В. Кинетическая модель удаления водорода при циркуляционном вакуумировании стали // Теория и технология металлургического производства. 2013. № 1 (13). С. 31–33.
  16. Минаев Ю.А., Яковлев В.В. Физико-химия в металлургии. (Термодинамика. Гидродинамика. Кинетика). М.: МИСИС, 2001. 320 с.
  17. Гизатулин Р.А., Дмитриенко В.И. Внепечные и ковшевые процессы обработки стали. Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2006. 181 с.
  18. Hupfer P., Abratis H., Maas H., Manfred M. Strömungsmechanische und reaktionskinetische Vorgänge bei der Vakuumbehandlung von flüssigem Stahl nach dem Umlaufverfahren // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1971. Bd. 42. No. 11. S. 761–767. <https://doi.org/10.1002/srin.197102663>
  19. Yamaguchi K., Kishimoto Y., Sakuraya T., Fujii T., Aratani M., Nishikawa H. Effect of refining conditions for ultra low carbon steel on decarburization reaction in RH degasser // ISIJ International. 1992. Vol. 32. No. 1. P. 126–135. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.32.126>
  20. Young-Geun Park, Won-Chul Doo, Kyung-Woo Yi, Sang-Bok An. Numerical calculation of circulation flow rate in the degassing rheinstahl-heraeus process // ISIJ International. 2000. Vol. 40. No. 8. P. 749–755. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.749>
  21. Young-Geun Park, Kyung-Woo Yi, Sang-Bog Ahn. The effect of operating parameters and dimensions of the RH system on melt circulation using numerical calculations // ISIJ International. 2001. Vol. 41. No. 5. P. 403–409. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.403>
  22. Kato Y., Fujii T., Suetsugu S., Ohmiya S., Aizawa K. Effect of geometry of vacuum vessel on decarburization rate and final carbon content in RH degasser // Tetsu-to-Hagane. 1993. Vol. 79. No. 11. P. 1248–1253. [https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.79.11\\_1248](https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.79.11_1248)
  23. Takahashi M., Matsumoto H., Saito T. Mechanism of decarburization in RH degasser // ISIJ International. 1995. Vol. 35. No. 12. P. 1452–1458. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.35.1452>
  24. Kitamura T., Miyamoto K., Tsujino R., Mizoguchi S., Kato K. Mathematical model for nitrogen in vacuum degasser desorption and decarburization reaction in vacuum degasser // ISIJ International. 1996. Vol. 36. No. 4. P. 395–401. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.395>
  25. Ono K., Yanagida M., Katoh T., Miwa M., Okamoto T. The Circulation Rate of RH-Degassing Process by Water Model Experiment // Denki Seiko. 1981. Vol. 56. No. 7. P. 149–157.
  26. Темберген Д., Теворт Р., Робей Р. Обработка стали в ковше с использованием технологии циркуляционного вакуумирования // Металлургическое производство и технология. 2007. № 2. С. 12–16.
  27. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали. М.: Мир, ООО «Издательство АСТ», 2003. 528 с.
  - of Sci. Papers. Yekaterinburg: UB RAS, 2003, pp. 203–207. (In Russ.).
  12. Knüppel H. *Desoxydation und Vakuumbehandlung von Stahlschmelzen. Bd. 2, Grundlagen und verfahren der Pfannenmetallurgie*. Düsseldorf: Verl. Stahleisen, 1983. (In Germ.). (Russ. ed.: Knyuppel' G. *Raskislenie i vakuumnaya obrabotka stali. Osnovy i tekhnologiya kovshovoi metallurgii*. Moscow: Metallurgiya, 1984, 414 p.).
  13. Knüppel H. *Desoxydation und Vakuumbehandlung von Stahlschmelzen. Bd. 1. Thermodynamische und kinetische Grundlagen*. Düsseldorf: Verl. Stahleisen, 1983. (In Germ.). (Russ. ed.: Knyuppel' G. *Raskislenie i vakuumnaya obrabotka stali. Termodinamicheskie i kineticheskie zakonomernosti*. Moscow: Metallurgiya, 1973, 312 p. (In Russ.).
  14. Metelkin A.A., Sheshukov O.Yu., Nekrasov I.V., Shevchenko O.I., Korogodskii A.Yu. On removing hydrogen from metal in a circulating vacuum degasser. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2016, no. 1 (18), pp. 29–33. (In Russ.).
  15. Selivanov V.N., Budanov B.A., Alankin D.V. Kinetic model of hydrogen removal during circulation vacuum degassing of steel. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2013, no. 1 (13), pp. 31–33. (In Russ.).
  16. Minaev Yu.A., Yakovlev V.V. *Physical Chemistry in Metallurgy (Thermodynamics. Hydrodynamics. Kinetics)*. Moscow: NUST "MISIS", 2001, 320 p. (In Russ.).
  17. Gizatulin R.A., Dmitrienko V.I. *Out-of-Furnace and Ladle Processing of Steel*. Novokuznetsk: izd. SibSIU, 2006, 181 p. (In Russ.).
  18. Hupfer P., Abratis H., Maas H., Manfred M. Strömungsmechanische und reaktionskinetische Vorgänge bei der Vakuumbehandlung von flüssigem Stahl nach dem Umlaufverfahren. *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1971, vol. 42, no. 11, pp. 761–767. (In Germ.). <https://doi.org/10.1002/srin.197102663>
  19. Yamaguchi K., Kishimoto Y., Sakuraya T., Fujii T., Aratani M., Nishikawa H. Effect of refining conditions for ultra low carbon steel on decarburization reaction in RH degasser. *ISIJ International*. 1992, vol. 32, no. 1, pp. 126–135. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.32.126>
  20. Young-Geun Park, Won-Chul Doo, Kyung-Woo Yi, Sang-Bok An. Numerical calculation of circulation flow rate in the degassing Rheinstahl-Heraeus process. *ISIJ International*. 2000, vol. 40, no. 8, pp. 749–755. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.749>
  21. Young-Geun Park, Kyung-Woo Yi, Sang-Bog Ahn. The effect of operating parameters and dimensions of the RH system on melt circulation using numerical calculations. *ISIJ International*. 2001, vol. 41, no. 5, pp. 403–409. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.403>
  22. Kato Y., Fujii T., Suetsugu S., Ohmiya S., Aizawa K. Effect of geometry of vacuum vessel on decarburization rate and final carbon content in RH degasser. *Tetsu-to-Hagane*. 1993, vol. 79, no. 11, pp. 1248–1253. [https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.79.11\\_1248](https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.79.11_1248)
  23. Takahashi M., Matsumoto H., Saito T. Mechanism of decarburization in RH degasser. *ISIJ International*. 1995, vol. 35, no. 12, pp. 1452–1458. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.35.1452>
  24. Kitamura T., Miyamoto K., Tsujino R., Mizoguchi S., Kato K. Mathematical model for nitrogen in vacuum degasser desorption and decarburization reaction in vacuum degasser. *ISIJ International*. 1996, vol. 36, no. 4, pp. 395–401. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.395>
  25. Ono K., Yanagida M., Katoh T., Miwa M., Okamoto T. The circulation rate of RH-degassing process by water model experiment. *Denki Seiko*. 1981, vol. 56, no. 7, pp. 149–157.
  26. Tembergen D., Tervort R., Robei R. Treatment of steel in a ladle using technology of circulating vacuum degassing. *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya*. 2007, no. 2, pp. 12–16. (In Russ.).
  27. Kudrin V.A. *Theory and Technology of Steelmaking*. Moscow: Mir, AST, 2003, 528 p. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Константин Николаевич Плешивцев**, начальник участка конвертерного цеха № 2, ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»

**E-mail:** Pleshivtsev\_kn@nlmk.com

**Олег Юрьевич Шешуков**, д.т.н., профессор, директор Института новых материалов и технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, главный научный сотрудник лаборатории порошковых, композиционных и наноматериалов, Институт металлургии УрО РАН

**E-mail:** o.j.sheshukov@urfu.ru

**Олег Игоревич Шевченко**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургической технологии, Нижнетагильский технологический институт филиал Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

**E-mail:** Shevchenko-OI@ntiustu.ru

**Анатолий Алексеевич Метелкин**, к.т.н., старший преподаватель кафедры металлургической технологии, Нижнетагильский технологический институт (филиал) Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

**E-mail:** anatoliy82@list.ru

**Konstantin N. Pleshivtsev**, Head of the Section of Converter Shop No. 2, PJSC "Novolipetsk Metallurgical Plant"

**E-mail:** Pleshivtsev\_kn@nlmk.com

**Oleg Yu. Sheshukov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Chief Researcher of the Laboratory of Powder, Composite and Nano-Materials, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

**E-mail:** o.j.sheshukov@urfu.ru

**Oleg I. Shevchenko**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair of Metallurgical Technology, Nizhny Tagil Technological Institute (Branch) of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

**E-mail:** Shevchenko-OI@ntiustu.ru

**Anatolii A. Metelkin**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Metallurgical Technology, Nizhny Tagil Technological Institute (Branch) of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

**E-mail:** anatoliy82@list.ru

Поступила в редакцию 08.10.2020

После доработки 19.11.2020

Принята к публикации 25.02.2021

Received 08.10.2020

Revised 19.11.2020

Accepted 25.02.2021



Оригинальная статья

УДК 621.771.011

DOI 10.17073/0368-0797-2021-8-550-560



## ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ ПРОКАТКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

А. А. Уманский<sup>1</sup>, А. Б. Юрьев<sup>1</sup>, В. В. Дорофеев<sup>2</sup>, Л. В. Думова<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (Россия, 654043, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ш. Космическое, 16)

**Аннотация.** На основании исследований процессов формирования напряженно-деформированного металла при прокатке железнодорожных рельсов в черновых клетях универсального рельсобалочного стана, проведенных с использованием программного комплекса DEFORM-3D, определены особенности распределения критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раската для калибров различной формы. Установлен крайне неравномерный характер распределения критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раската. По полученным данным в осевой зоне значения указанного критерия минимальны, а в приповерхностных слоях наибольшее значение критерия Кокрофта-Лэтэма и, соответственно, наибольшая вероятность образования дефектов имеют место вблизи вертикальной оси калибров. В калибрах сложной формы («трапеция», «лежачая трапеция», рельсовые калибры) выявлено наличие локальных зон с максимальным значением критерия Кокрофта-Лэтэма, расположенных в местах формирования подошвы рельсового профиля, а для прокатки в калибре типа «трапеция» характерно наличие такой области также в приповерхностной зоне вблизи вертикальной оси калибра. В рамках определения закономерностей формирования схемы напряженно-деформированного состояния металла на начальной стадии прокатки рельсов установлена прямая взаимосвязь между неравномерностью распределения температуры по сечению раската и значениями (максимальными и средними по сечению) критерия Кокрофта-Лэтэма. При этом показано, что неравномерность распределения температуры по сечению раската имеет тенденцию к снижению при увеличении коэффициентов вытяжек по проходам и повышении частоты кантовок независимо от формы используемых калибров. Для калибров сложной формы установлено, что в дополнение к перечисленным параметрам значимое влияние на снижение температурной неоднородности также оказывает повышение подобия формы подката и используемого калибра. На основании результатов проведенных теоретических исследований разработан новый режим прокатки железнодорожных рельсов, опытно-промышленное опробование которого в условиях универсального рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК» показало снижение отбраковки рельсов на 0,78 % по сравнению с ранее использовавшимся режимом прокатки.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние металла, железнодорожные рельсы, универсальный рельсобалочный стан, черновые клетки, математическое моделирование

**Финансирование:** Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-48-420011.

**Для цитирования:** Уманский А.А., Юрьев А.Б., Дорофеев В.В., Думова Л.В. Исследования напряженно-деформированного состояния металла на начальной стадии прокатки железнодорожных рельсов // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 8. С. 550–560. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-550-560>

Original article

## STRESS-STRAIN STATE OF METAL AT THE INITIAL STAGE OF RAILWAY RAILS ROLLING

A. A. Umanskii<sup>1</sup>, A. B. Yur'ev<sup>1</sup>, V. V. Dorofeev<sup>2</sup>, L. V. Dumova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

<sup>2</sup> JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant” (16 Kosmicheskoe Route, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654043, Russian Federation)

**Abstract.** Based on the studies of stress-strain metal formation during railway rails rolling in roughing stands of a universal rail-and-beam mill, carried out using the DEFORM-3D software package, the authors have determined the features of distribution of the Cockcroft-Latham criterion over the cross-section of the rolled stock of various shapes. An extremely uneven distribution of the Cockcroft-Latham criterion over the roll section has been established. According to the data obtained, values of the specified criterion are minimal in the axial zone, and in the near-surface layers the greatest value of the Cockcroft-Latham criterion and, accordingly, the highest probability of defects formation occur near the gauge vertical axis. In gauges of complex shape (“trapezium”, “recumbent trapezium”, rail gauges), the authors have revealed the presence of local zones with maximum Cockcroft-Latham criterion, located in the places where the foot of the rail profile is formed. And rolling in gauge of the “trapezium” type is marked

by the presence of such a zone in the near-surface area near the gauge vertical axis. Within the framework of determining formation regularities of the diagram of metal stress-strain state at the initial stage of rail rolling, direct relationship was established between the uneven temperature distribution over the section of rolling and the values (maximum and average over the section) of the Cockcroft-Latham criterion. At the same time, it was shown that uneven temperature distribution over the cross-section of the roll tends to decrease with an increase in the coefficients of extracts along the passes and increase in tilting frequency, regardless of the shape of the used gauges. For gauges of complex shape, in addition to the listed parameters, an increase in similarity of shape of the roll and gauge used also has a significant effect on reducing temperature inhomogeneity. Based on the results of theoretical studies, a new mode of railway rails rolling has been developed. Its pilot testing in the conditions of a universal rail-and-beam mill of JSC “EVRAZ ZSMK” has shown a decrease in rail rejection by 0.78 % compared to the previously used rolling mode.

**Keywords:** stress-strain state of metal, railway rails, universal rail-and-beam mill, roughing stand, mathematical modeling

**Funding:** The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Kemerovo Region within the framework of the scientific project No. 20-48-420011.

**For citation:** Umanskii A.A., Yur'ev A.B., Dorofeev V.V., Dumova L.V. Stress-strain state of metal at the initial stage of railway rails rolling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 8, pp. 550–560. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-550-560>

## ВВЕДЕНИЕ

Качество готового проката в значительной степени определяется схемой напряженно-деформированного состояния (НДС) металла на различных стадиях его прокатки [1 – 3]. Использование режимов прокатки, позволяющих сформировать благоприятную схему НДС раската, обуславливает не только снижение вероятности образования поверхностных и внутренних дефектов в процессе деформации, но и создает условия для выкатываемости дефектов, уже имеющихся в исходных заготовках [4, 5]. При проектировании режимов прокатки следует учитывать, что на формирование НДС в объеме раската оказывает влияние значительное количество одновременно действующих параметров, в том числе геометрические и температурно-скоростные условия деформации (форма и размеры калибров и исходного подката, температура, скорость и степень деформации), особенности структуры и свойств деформируемого металла [6 – 10]. Поэтому проведение исследований процессов формирования НДС металла в процессе прокатки с учетом их взаимосвязи с параметрами деформации является актуальной задачей, в особенности применительно к прокатной продукции специального назначения с повышенными требованиями к характеристикам качества, в частности к железнодорожным рельсам.

На сегодняшний день более 80 % рельсов в РФ производится на универсальных рельсобалочных станах (АО «ЕВРАЗ ЗСМК», ПАО «Мечел»), имеющих в своем составе черновые реверсивные клетки и непрерывную группу универсальных клеток («тандем»). Схема прокатки в черновых реверсивных клетях таких станом включает в себя последовательную деформацию в ящичных калибрах (первые проходы), калибрах типа «трапеция», близких по форме к ящичным калибрам, и рельсовых калибрах (последние проходы) [11 – 14]. Полученный после черновых клеток подкат, по форме поперечного сечения близкий к готовым рельсам, поступает в клетки группы «тандем» для непрерывной чистовой прокатки. Применение такой схемы прокатки обуславливает тот факт, что наибольшие обжатия

характерны для черновых клеток [15 – 18], а в универсальных клетях, основной задачей прокатки в которых является формирование требуемого профиля рельсов с необходимой точностью размеров [19 – 23], имеет место только незначительная по величине деформация металла. В соответствии с вышесказанным применительно к производству рельсов в условиях универсальных рельсобалочных станом наибольший научно-практический интерес представляет исследование закономерностей формирования НДС металла при прокатке в черновых клетях.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объект исследования – режим прокатки, принятый на момент проведения работы на универсальном рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК» для производства рельсов Р65 (рис. 1, табл. 1).

Исследования проводили методом математического моделирования в программном комплексе DEFORM-3D. В основу работы рассматриваемого программного комплекса заложен метод конечных элементов (МКЭ) [24]. Сущность МКЭ заключается в представлении исследуемого объекта или области в виде совокупности дискретных (конечных) элементов (подобластей), для каждого из которых выбирается вид аппроксимирующей функции, преимущественно в виде полинома первой степени [25, 26]. При использовании МКЭ решается задача поиска значений функций на границах конечных элементов (в узлах), исходя из положения, что вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю. Следует отметить, что МКЭ является на сегодняшний день наиболее распространенным методом математического моделирования процессов пластической деформации. Этот факт объясняется его универсальностью, то есть наличием минимальных ограничений по области применения. В частности, при использовании МКЭ существует возможность получения точных данных не только для плоских, но и для объемных задач, в том числе для профилей со сложной формой поперечного сечения, решения задач могут быть получены не только применительно к однородной

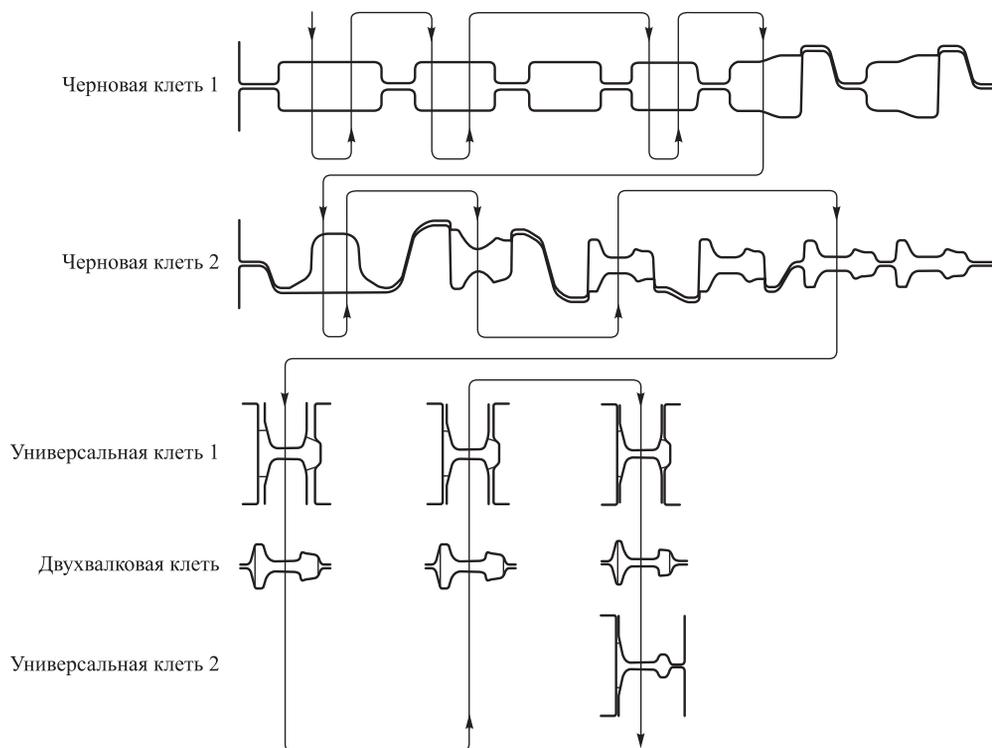


Рис. 1. Режим прокатки железнодорожных рельсов, использованный при проведении математического моделирования НДС металла

Fig. 1. Rolling mode of railway rails used in mathematical modeling of the metal stress-strain state

Таблица 1

**Режим прокатки заготовок 300×360 мм железнодорожных рельсов в черновых клетях, использованный при проведении моделирования**

Table 1. Mode of railway rails billets (300×360 mm) rolling in roughing stands, used in modeling

| Черновая клеть  | Номер прохода      | Форма калибра | Сечение раската, мм |        | Обжатие, мм | Скорость прокатки, м/с |
|-----------------|--------------------|---------------|---------------------|--------|-------------|------------------------|
|                 |                    |               | высота              | ширина |             |                        |
| 1               | кантовка на 90°    |               |                     |        |             |                        |
|                 | 1                  | ящичный       | 305,0               | 310,0  | 55,0        | 3,0                    |
|                 | 2                  | ящичный       | 257,0               | 320,0  | 48,0        | 3,5                    |
|                 | кантовка на 90°    |               |                     |        |             |                        |
|                 | 3                  | ящичный       | 260,0               | 267,0  | 60,0        | 4,0                    |
|                 | 4                  | ящичный       | 215,0               | 277,0  | 45,0        | 3,8                    |
|                 | кантовка на 90°    |               |                     |        |             |                        |
| 5               | ящичный            | 257,0         | 220,0               | 20,0   | 4,0         |                        |
| 6               | ящичный            | 232,0         | 225,0               | 25,0   | 4,0         |                        |
| кантовка на 90° |                    |               |                     |        |             |                        |
| 7               | «лежачая трапеция» | 210,0         | 246,0               | 15,0   | 5,0         |                        |
| 2               | кантовка на 90°    |               |                     |        |             |                        |
|                 | 1                  | «трапеция»    | 200,5               | 250,0  | 45,5        | 4,7                    |
|                 | 2                  | «трапеция»    | 194,5               | 250,0  | 6,0         | 4,0                    |
|                 | кантовка на 90°    |               |                     |        |             |                        |
|                 | 3                  | рельсовый     | 80,0                | 215,3  | 90,0        | 3,5                    |
| 4               | рельсовый          | 55,0          | 222,9               | 25,0   | 4,0         |                        |
| 5               | рельсовый          | 43,0          | 234,0               | 12,0   | 5,0         |                        |

среде, но и в среде с нелинейными эффектами в отдельных элементах. Основным недостатком МКЭ, заключающийся в сложности применяемого математического аппарата и трудоемкости вычислений, в настоящее время является несущественным в связи с развитием ЭВМ. Возможности современных компьютерных технологий, реализованные в вышеуказанном программном комплексе, позволяют проводить моделирование процессов пластической деформации при разбиении деформируемого тела на  $10^3$ ,  $10^4$  (и более) конечных элементов. При этом анализ динамики параметров, характеризующих процесс деформации, возможно проводить с временными интервалами, не превышающими долей секунд.

Моделирование проводили для стали марки Э76ХФ, при этом использовали зависимости сопротивления пластической деформации рассматриваемой стали от термомеханических параметров деформации (температура, скорость и степень деформации), полученные в ходе экспериментальных исследований [27, 28]. Также при проведении моделирования процессов деформации металла в калибрах использовали закономерности изменения сопротивления пластической деформации по сечению исходных непрерывнолитых заготовок [29]. В качестве допущений приняли, что материал валков является несжимаемым, а процесс прокатки – симметричным. Коэффициент трения приняли изменяющимся по формуле Гелей:

$$\mu = 1,05 - 0,0005t - 0,056V, \quad (1)$$

где  $t$  – температура прокатки, °С;  $V$  – скорость прокатки, м/с.

Температуру заготовок перед началом прокатки в первой клетке приняли 1200 °С. При построении конечно-элементной сетки количество элементов составило 180 845, узлов – 40 089.

В качестве параметра, характеризующего напряженно-деформированное состояние металла при прокатке, использовали критерий Кокрофта-Лэтэма, рассчитываемый по следующей формуле:

$$D = \int_0^{\bar{\epsilon}} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon}, \quad (2)$$

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

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты (рис. 2) свидетельствуют о крайне неравномерном характере распределения критерия Кокрофта-Лэтэма по сечению раската. В осевой зоне раскатов независимо от формы калиб-

ров значения указанного критерия минимальны, что объясняется неполным проникновением деформации в глубь раската. Максимальные значения критерия Кокрофта-Лэтэма для ящичных калибров имеют место в приповерхностных слоях вблизи вертикальной оси калибров (рис. 2, а, б), что согласуется с результатами ранее проведенных исследований [30] и обусловлено отсутствием горизонтальных перемещений металла в указанной зоне раската (имеют место только вертикальные деформации). При прокатке в калибрах сложной формы («трапеция», «лежачая трапеция», рельсовые калибры) имеют место локальные зоны с максимальным значением критерия Кокрофта-Лэтэма, расположенные в местах формирования подошвы профиля (рис. 2, г – е), при этом для прокатки в калибре типа «трапеция» характерно наличие такой зоны также в приповерхностной зоне вблизи вертикальной оси калибра (рис. 2, з).

Одним из основных параметров [3, 7, 9], оказывающих значимое влияние на формирование схемы НДС металла в процессе прокатки, является неравномерность распределения температуры по сечению раската. С целью подтверждения указанной взаимосвязи для условий прокатки в черновых клетях рельсобалочного стана проведены дополнительные исследования температурных полей с использованием моделирования в программном комплексе DEFORM-3D. Исходные условия для проведения моделирования приняли аналогичными вышеприведенным условиям моделирования НДС металла.

Для проверки адекватности полученных при моделировании результатов проводили расчет температуры раската аналитическим методом с использованием методики, представленной в работе [3] и позволяющей определить падение температуры по проходам:

$$\Delta t_i = \frac{1000}{\sqrt[3]{\frac{0,025\Pi_i\tau_i}{S_i} + \left(\frac{1000}{t_{oi} + \Delta t_{di} + 273}\right)^3}}, \quad (3)$$

где  $\Pi_i$  – периметр поперечного сечения после прохода;  $\tau_i$  – время охлаждения раската при перемещении от рассматриваемого калибра к следующему калибру;  $t_{oi}$  – температура перед входом в рассматриваемый калибр;  $\Delta t_{di} = 0,183\sigma \ln \lambda$  – повышение температуры раската в рассматриваемом калибре;  $\sigma$  – сопротивление металла пластической деформации, МПа;  $\lambda$  – коэффициент вытяжки.

Также использовали данные прямых замеров температуры поверхности раската.

Сопоставление результатов моделирования средней температуры раската по проходам, полученных с использованием программного комплекса DEFORM-3D, с данными, полученными аналитическим методом по уравнению (3), свидетельствует о достаточно высокой

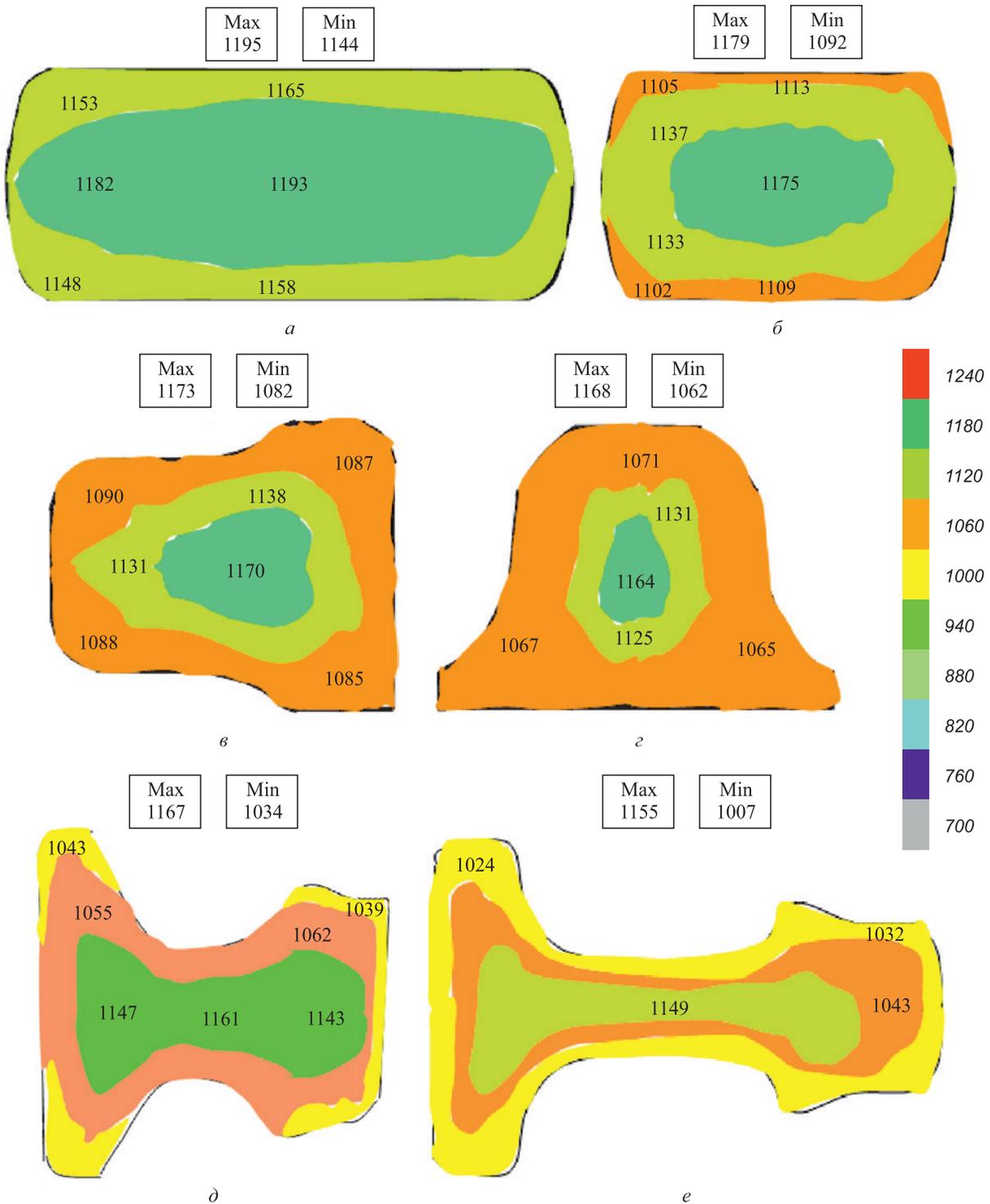


Рис. 2. Распределение температурных полей в поперечном сечении раската на начальной стадии прокатки рельсов: а, б и в – второй, шестой и седьмой проходы в черновой клети 1; г, д и е – первый, третий и пятый проходы в черновой клети 2

Fig. 2. Distribution of temperature fields in cross-section of the rolled stock at the initial stage of rail rolling: а, б and в – the second, sixth and seventh passes in the roughing stand 1; г, д and e – the first, third and fifth passes in the roughing stand 2

сходимости: отклонения не превышают 10 °С. Непосредственные замеры температуры поверхности раската также показали хорошую сходимость с результатами моделирования: отклонения не превышают 14 °С. Таким образом, можно сделать вывод об адекватности методики моделирования температурных полей в про-

граммном комплексе DEFORM-3D и возможности ее применения для прогнозирования распределения температурных полей по сечению раската.

В связи с трудностью интерпретации полученных данных при их представлении в виде цветowych эпюр (рис. 3) рассчитаны средние значения по укрупнен-

ным областям и предложено использовать коэффициент неравномерности температурных полей, определяемый по формуле:

$$K_{нт} = \frac{t_{\max} S_{уд.\max}}{t_{\min} S_{уд.\min}}, \quad (4)$$

где  $S_{уд.\max}$  и  $S_{уд.\min}$  – удельные площади областей профиля раската с максимальной и минимальной температурами (определяются как отношение площадей рассматриваемых областей к общей площади поперечного сечения раската);  $t_{\max}$  и  $t_{\min}$  – максимальная и минимальная температуры по областям профиля раската.

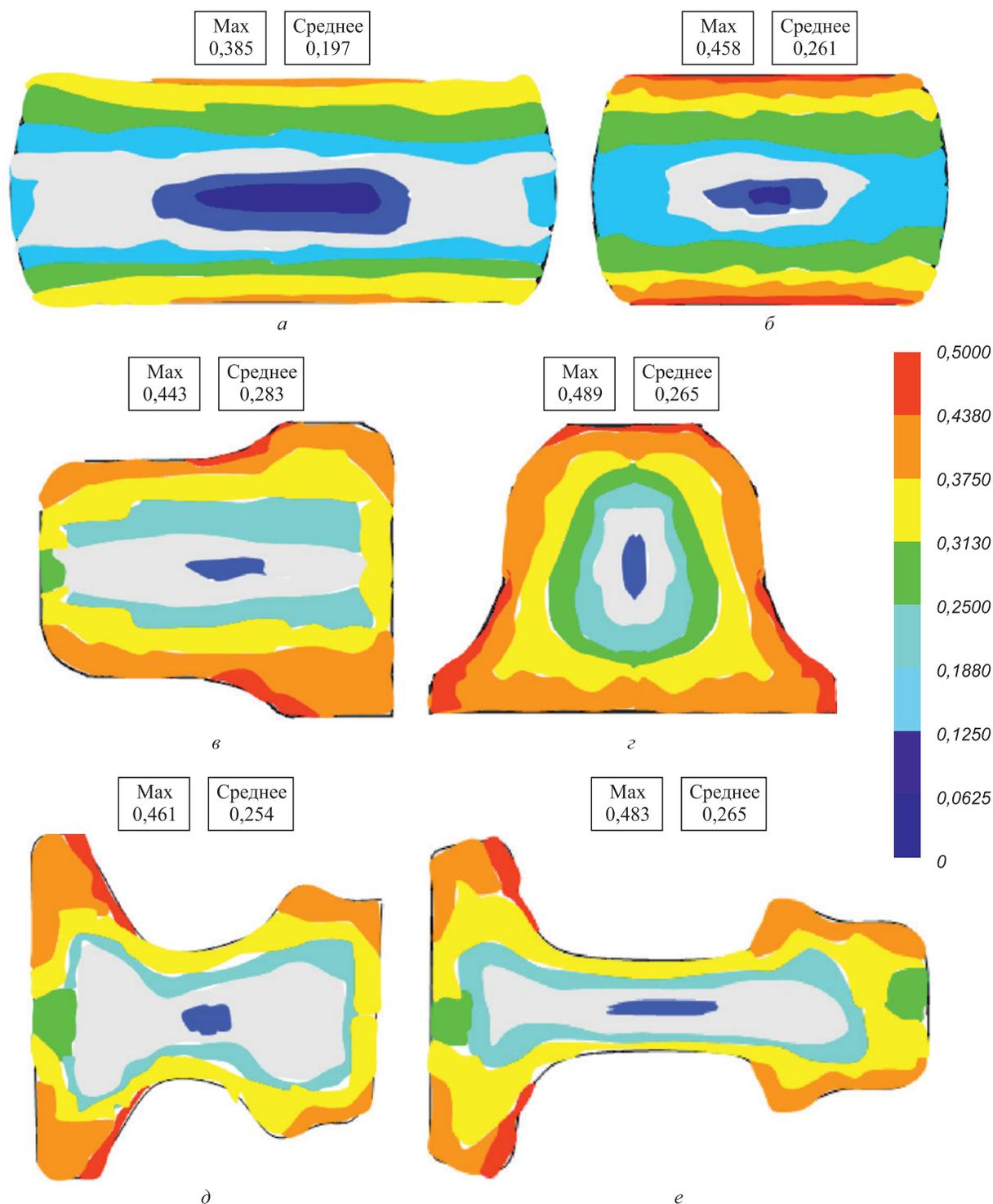


Рис. 3. Распределение критерия Кокрофта-Лэтэма в поперечном сечении раската на начальной стадии прокатки рельсов: а, б и в – второй, шестой и седьмой проходы в черновой клети 1; г, д и е – первый, третий и пятый проходы в черновой клети 2

Fig. 3. Distribution of the Cockcroft-Latham criterion in cross-section of the rolled stock at the initial stage of rail rolling: а, б and в – the second, sixth and seventh passes in the roughing stand 1; г, д and е – the first, third and fifth passes in the roughing stand 2

Проведенный анализ показал, что изменение максимальных и средних значений критерия Кокрофта-Лэтэма при прокатке во всех проходах и калибрах черновых клетей прямо пропорционально изменению коэффициента неравномерности температурных полей (рис. 4), что свидетельствует о правомерности использования указанного коэффициента в качестве показателя, характеризующего схему НДС металла при прокатке. Повышение коэффициента неравномерности температурных полей обуславливает формирование менее благоприятной с точки зрения прогнозных показателей качества готового проката схемы НДС.

Определение коэффициента неравномерности температурных полей с использованием моделирования в программном комплексе DEFORM-3D требует значительных временных затрат. Поэтому с целью практического применения полученных закономерностей с использованием стандартных методик статистического анализа получены уравнения регрессии, устанавливающие взаимосвязь между измеряемыми параметрами деформации и указанным коэффициентом. Для ящичных калибров установлено значимое влияние кантовок раската и коэффициента вытяжки на неравномерность распределения температурных полей. Механизм указанного влияния состоит в следующем. Увеличение деформации приводит к разогреву металла при прокатке, в особенности поверхностных слоев, что способствует снижению неравномерности распределения температуры по сечению раската. Кантовка раската также способствует уменьшению неравномерности распределения температурных полей, поскольку происходит обновление слоев металла, непосредственно контактирующих с прокатными валками.

Для проходов, перед которыми кантовку раската не проводили, прогнозные значения коэффициента неравномерности распределения температуры определяются по выражению

$$K_{нт} = 1,01^n(-0,0597\lambda + 1,0778); R^2 = 0,892, \quad (5)$$

где  $n$  – номер прохода от начала прокатки (с учетом всех проходов).

Для проходов, перед которыми проводится кантовка раската, коэффициент неравномерности распределения температуры определяется как

$$K_{нт} = 1,01^n(-0,0351\lambda + 1,0332); R^2 = 0,808. \quad (6)$$

По полученным данным применительно к прокатке в калибрах сложной формы, используемых в черновых клетях рельсобалочного стана («трапеция», «лежачая трапеция», рельсовые калибры), корреляция между коэффициентом неравномерности температурных полей и указанными параметрами прокатки выражена в значительно меньшей степени по сравнению с прокаткой в ящичных калибрах. С учетом результатов

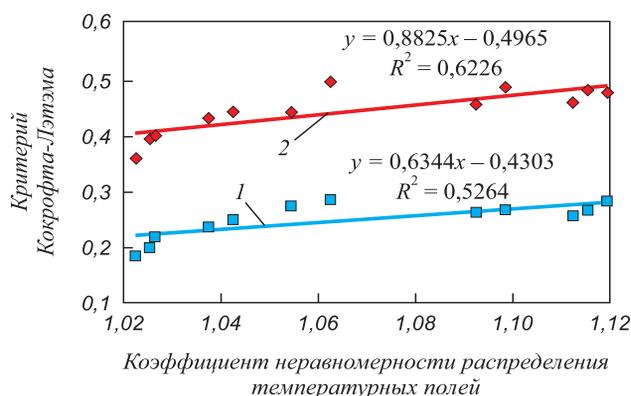


Рис. 4. Зависимость схемы НДС металла от неравномерности распределения температур по сечению раската при прокатке в черновых клетях универсального рельсобалочного стана:

1 и 2 – средние и максимальные по сечению значения критерия

Fig. 4. Dependence of the metal stress-strain state on uneven distribution of temperatures over the section of the rolled stock during rolling in roughing stands of a universal rail-and-beam mill:

1 and 2 – average and maximum values of the criterion over the section

исследований [30] этот факт можно объяснить низкой степенью подобия формы исходного подката и калибров. Для учета влияния подобия формы подката и калибра в настоящей работе предложено ввести соответствующий коэффициент:

$$K_{пф} = \frac{S_0 / \Pi_0}{S_1 / \Pi_1}, \quad (7)$$

где  $S_0$  и  $S_1$  – площадь поперечного сечения раската до и после прокатки в калибре;  $\Pi_0$  и  $\Pi_1$  – периметр поперечного сечения раската до и после прокатки в калибре.

Установлено, что с учетом влияния коэффициента подобия формы подката и калибра взаимосвязь между коэффициентом неравномерности распределения температурных полей по сечению раската и параметрами прокатки в калибрах сложной формы является значимой.

Полученные для калибров сложной формы уравнения регрессии имеют следующий вид:

– для проходов без кантовки:

$$K_{нт} = 1,01^n K_{пф}^{0,2}(-0,0473\lambda + 1,0145); R^2 = 0,886; \quad (8)$$

– для проходов, перед которыми проводится кантовка раската:

$$K_{нт} = 1,01^n K_{пф}^{0,2}(-0,0412\lambda + 1,0226); R^2 = 0,804. \quad (9)$$

На основании результатов вышеприведенных исследований можно констатировать, что общими направлениями для совершенствования режимов прокатки в черновых клетях универсальных рельсобалочных станов с целью формирования более благоприятной схемы НДС металла в процессе прокатки и соответствующего повышения качества готового проката явля-

Усовершенствованный режим прокатки заготовки 300×360 мм железнодорожных рельсов

Table 2. Improved mode of railway rails billets (300×360 mm) rolling

| Черновая клеть  | Номер прохода   | Форма калибра      | Сечение раската, мм |        | Обжатие, мм | Скорость прокатки, м/с |
|-----------------|-----------------|--------------------|---------------------|--------|-------------|------------------------|
|                 |                 |                    | высота              | ширина |             |                        |
| 1               | кантовка на 90° |                    |                     |        |             |                        |
|                 | 1               | ящичный            | 260,0               | 375,0  | 40,0        | 4,0                    |
|                 | 2               | ящичный            | 317,0               | 270,0  | 58,0        | 4,5                    |
|                 | 3               | ящичный            | 266,0               | 280,0  | 51,0        | 5,0                    |
|                 | кантовка на 90° |                    |                     |        |             |                        |
|                 | 4               | ящичный            | 219,0               | 276,0  | 61,0        | 4,8                    |
|                 | кантовка на 90° |                    |                     |        |             |                        |
|                 | 5               | ящичный            | 222,0               | 229,0  | 54,0        | 5,0                    |
|                 | кантовка на 90° |                    |                     |        |             |                        |
|                 | 6               | «лежачая трапеция» | 207,0               | 240,0  | 22,0        | 4,5                    |
| кантовка на 90° |                 |                    |                     |        |             |                        |
| 7               | «трапеция»      | 195,5              | 230,0               | 44,5   | 5,0         |                        |
| 2               | кантовка на 90° |                    |                     |        |             |                        |
|                 | 1               | рельсовый          | 80,0                | 220,5  | 110,0       | 4,5                    |
|                 | 2               | рельсовый          | 53,0                | 229,5  | 27,0        | 3,8                    |
|                 | 3               | рельсовый          | 42,0                | 238,5  | 11,0        | 5,0                    |

ется увеличение коэффициента вытяжки по проходам, то есть снижение общего количества проходов за счет повышения частных обжатий (с учетом ограничения по допустимому усилию и моменту прокатки); увеличение количества кантовок; изменение формы калибров сложной формы в сторону увеличения подобия с формой поперечного сечения исходного подката.

С учетом этих рекомендаций разработан новый режим прокатки рельсов в условиях рельсобалочного стана АО «ЕВРАЗ ЗСМК» (табл. 2), основными отличительными особенностями которого является снижение общего количества проходов за счет увеличения частных обжатий и увеличение количества кантовок.

Опытно-промышленное опробование нового режима прокатки железнодорожных рельсов показало, что при его использовании отбраковка рельсов по дефектам поверхности снизилась на 0,78 % относительно ранее использовавшегося режима прокатки. Подтверждена адекватность и возможность применения на практике полученных закономерностей влияния параметров прокатки в черновых клетях рельсобалочных станов на качество готовых рельсов.

**Выводы**

На основании моделирования процессов прокатки в черновых клетях универсального рельсобалочного

стана, проведенного с использованием программного комплекса DEFORM-3D, определены закономерности формирования НДС металла на начальной стадии прокатки железнодорожных рельсов. Установлено, что на схему НДС металла при прокатке в черновых клетях рельсобалочного стана определяющее влияние оказывает неравномерность распределения температур по сечению раската, которая в свою очередь значительно зависит от коэффициентов вытяжки по проходам, частоты кантовок и подобия формы исходного подката и используемых калибров. Показано, что вне зависимости от формы используемых калибров повышение коэффициентов вытяжек (частных обжатий) и увеличение частоты кантовок обуславливает формирование более благоприятной схемы НДС, обеспечивающей повышение качества готовых рельсов. Применительно к калибрам сложной формы в дополнение к перечисленным параметрам установлено положительное влияние на формирование благоприятной схемы НДС повышения подобия формы подката и используемого калибра. Адекватность и возможность применения на практике полученных закономерностей подтверждена результатами опытно-промышленного опробования разработанного режима прокатки железнодорожных рельсов на рельсобалочном стане АО «ЕВРАЗ ЗСМК»: зафиксировано снижение отбраковки рельсов на 0,78 % по сравнению с ранее использовавшимся режимом прокатки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

- Сметанин С.В., Перетятко В.Н., Волков К.В. Исследования напряженно-деформированного состояния металла при прокатке трамвайных рельсов в универсальном четырехвалковом калибре // *Сталь*. 2014. № 7. С. 36–39.
- Перетятко В.Н., Сметанин С.В. Исследования напряженного состояния металла при прокатке в четырехвалковых разрезных калибрах // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2015. № 1. С. 28–33.
- Скосарь Е.О., Шилов В.А. Температурное и напряженно-деформированное состояние металла при прокатке рельсов // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2012. Т. 55. № 11. С. 63, 64.
- Кинзин Д.И., Рычков С.С. Использование программного комплекса DEFORM-3D при моделировании процессов сортовой прокатки // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2011. № 2. С. 45–48.
- Песин А.М., Салганик В.М., Пустовойтов Д.О., Курбан В.В., Молостов М.А., Васильев И.С., Лошкарёв М.А. Моделирование поведения поперечных трещин непрерывнолитых слэбов при черновой прокатке на широкополосных станах горячей прокатки // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2011. № 5 (1337). С. 48–52.
- Raab G.I., Raab A.G., Aleshin G.N., Kodirov I.S. Relationship between the stress-strain state and the imperfection of the structure of metals with SPD shear // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 672. No. 1. Article 012031. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/672/1/012031>
- Shishov I., Kolbasnikov N. Investigation of the metal stress-strain state peculiarities associated with the plate temperature field irregularity during rough rolling. In book: *METAL 2014 – 23<sup>rd</sup> Int. Conf. on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. 2014. P. 407–411.
- Kotrechko S.A., Popovich V.A. Effect of the characteristics of low-temperature plastic deformation of metals with bcc lattice on the stress-strain state at the tip of a macrocrack // *Strength of Materials*. 2002. Vol. 34Y. No. 5. P. 456–461. <https://doi.org/10.1023/A:1021046510298>
- Колбасников Н.Г., Шишов И.А., Корчагин А.М., Беляев А.А. Исследование влияния неравномерности температурного поля раската на характер напряженно-деформированного состояния металла в очаге деформации при прокатке толстого листа // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2013. № 4-1 (183). С. 183–192.
- Кинзин Д.И., Рычков С.С. Оценка эффективности калибровки сортовых профилей на основе программного комплекса DEFORM 3D // *Моделирование и развитие процессов ОМД*. 2011. № 1. С. 92–95.
- Полевой Е.В., Волков К.В., Головатенко А.В., Атконова О.П., Юнусов А.М. Совершенствование технологии производства рельсов на ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2013. № 4. С. 26–28.
- Shaburov D.V., Popov A.E., Zagumennov O.V. Rail production on a universal mill // *Steel in Translation*. 2016. Vol. 46. № 7. P. 503, 504. <https://doi.org/10.3103/S0967091216070111>
- Toschi F., Lainati A., Mazzarano A. The production of railway rails in modern and efficient plants – The new ARBZ rail mill // *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2017. № 3. P. 2543–2552.
- Lainati A. The rolling mill for rails and structural sections at Arbz // *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2018. May. P. 2443–2454.
- Gołdasz A., Malinowski Z., Hadała B., Rywotycki M. Influence of the radiation shield on the temperature of rails rolled in the reversing
- Smetanin S.V., Peretyat'ko V.N., Volkov K.V. Research of the stress-strain state of metal during rolling of tram rails in a universal four-roll gauge. *Stal'*. 2014, no. 7, pp. 36–39. (In Russ.).
- Peretyat'ko V.N., Smetanin S.V. Investigations of the stress state of metal during rolling in four-roll cut gauges. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2015, no. 1, pp. 28–33. (In Russ.).
- Skosar' E.O., Shilov V.A. Temperature conditions and stress-strain state of metal during long rail rolling. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 11, pp. 63, 64. (In Russ.).
- Kinzin D.I., Rychkov S.S. Use of DEFORM-3D software package in modeling of section rolling. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2011, no. 2, pp. 45–48. (In Russ.).
- Pesin A.M., Salganik V.M., Pustovoytov D.O., Kurban V.V., Molostov M.A., Vasil'ev I.S., Loshkarev M.A. Modeling the behavior of transverse cracks in continuously cast slabs during rough rolling on hot-strip mills. *Chernaya metallurgiya. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2011, no. 5 (1337), pp. 48–52. (In Russ.).
- Raab G.I., Raab A.G., Aleshin G.N., Kodirov I.S. Relationship between the stress-strain state and the imperfection of the structure of metals with SPD shear. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, vol. 672, no. 1, article 012031. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/672/1/012031>
- Shishov I., Kolbasnikov N. Investigation of the metal stress-strain state peculiarities associated with the plate temperature field irregularity during rough rolling. In: *METAL 2014 – 23<sup>rd</sup> Int. Conf. on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. 2014, pp. 407–411.
- Kotrechko S.A., Popovich V.A. Effect of the characteristics of low-temperature plastic deformation of metals with bcc lattice on the stress-strain state at the tip of a macrocrack. *Strength of Materials*. 2002, vol. 34Y, no. 5, pp. 456–461. <https://doi.org/10.1023/A:1021046510298>
- Kolbasnikov N.G., Shishov I.A., Korchagin A.M., Belyaev A.A. Influence of unevenness of temperature field of rolled products on nature of stress-strain state of metal in deformation zone during a plate rolling. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Petersburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2013, no. 4-1 (183), pp. 183–192. (In Russ.).
- Kinzin D.I., Rychkov S.S. Evaluation of the efficiency of high-quality profiles design based on DEFORM 3D software package. *Modelirovanie i razvitie protsessov OMD*. 2011, no. 1, pp. 92–95. (In Russ.).
- Polevoi E.V., Volkov K.V., Golovatenko A.V., Atkonova O.P., Yunusov A.M. Improvement of rails production technology at JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant”. *Problemy chernoï metallurgii i materialovedeniya*. 2013, no. 4, pp. 26–28. (In Russ.).
- Shaburov D.V., Popov A.E., Zagumennov O.V. Rail production on a universal mill. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 7, pp. 503, 504. <https://doi.org/10.3103/S0967091216070111>
- Toschi F., Lainati A., Mazzarano A. The production of railway rails in modern and efficient plants – The new ARBZ rail mill. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2017, no. 3, pp. 2543–2552.
- Lainati A. The rolling mill for rails and structural sections at Arbz. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2018, May, pp. 2443–2454.
- Gołdasz A., Malinowski Z., Hadała B., Rywotycki M. Influence of the radiation shield on the temperature of rails rolled in the revers-

- mill // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015. Vol. 60. No. 1. P. 275–279. <http://doi.org/10.1515/amm-2015-0044>
16. Kumar P., Singh A.P., Gupta I.N.P., Dubey P.K. Up-grading reheating furnaces at the rail & structural mill of Bhilai Steel Plant // *Steel Times International*. 2010. Vol. 34. No. 2. P. 38–42.
  17. Dong Y.-G., Zhang W.-Z., Song J.-F. Theoretical and experimental research on rolling force for rail hot rolling by universal mill // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2010. Vol. 17. No. 1. P. 27–32. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60040-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60040-4)
  18. Guo Y.-J., Xie Z.-J., Wang Y.-Z., Tao G.-M. Multiplex analytical method for metal three-dimensional flow of heavy rail rolling by universal mill // *Chongqing Daxue Xuebao / Journal of Chongqing University*. 2010. Vol. 33. No. 1. P. 31–35.
  19. Guo Y., Xie Z., Wang Y., Tao G., Yang Q. Study on optimization model of rolling parameters of high speed rail by universal mill // *Zhongguo Jixie Gongcheng / China Mechanical Engineering*. 2010. Vol. 21. No. 10. P. 1200–1202.
  20. Song J.-F., Zhang J.-T., Dong Y.-G. Theoretical and experimental research on the law of longitudinal flow in rail universal rolling // *Suxing Gongcheng Xuebao / Journal of Plasticity Engineering*. 2013. Vol. 20. No. 3. P. 10–15.
  21. Liu Y., Wang Y., Zhu H., Chen L.E. Effects of continuous rolling speed change rates on geometric dimension between two racks when rolling rail by universal pass // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 538–541. P. 2941–2944. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.538-541.2941>
  22. Dong Y., Zhang W., Song J. Theoretical and experimental research on the elongation law of the rail in rail rolling by a universal mill // *Jixie Gongcheng Xuebao / Journal of Mechanical Engineering*. 2010. Vol. 46. No. 6. P. 87–92. <https://doi.org/10.3901/JME.2010.06.087>
  23. Dong Y., Zhang W., Song J. Theoretical and experimental research on the spread of the head of rail in rail rolling by a universal mill // *Zhongguo Jixie Gongcheng / China Mechanical Engineering*. 2009. Vol. 20. No. 8. P. 1004–1007.
  24. Харламов А.А., Латаев А.П., Галкин В.В., Уланов П.В. Моделирование обработки металлов давлением с помощью комплекса «DEFORM» // САПР и графика. 2005. № 5. С. 2–4.
  25. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. М.: Мир, 2006. 464 с.
  26. Kobayashi S., Oh S.-I., Altan T. *Metal Forming and the Finite-Element Method*. Oxford: Oxford University Press, 1989. 333 p.
  27. Уманский А.А., Дорофеев В.В., Думова Л.В. Разработка теоретических основ энергоэффективного производства железнодорожных рельсов с повышенными эксплуатационными свойствами // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020. Т. 63. № 5. С. 318–326. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-318-326>
  28. Уманский А.А., Головатенко А.В., Симачев А.С., Дорофеев В.В., Осколкова Т.Н. Исследования пластичности и сопротивления деформации легированных рельсовых сталей в температурном интервале прокатки // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 6. С. 452–460. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-6-452-460>
  29. Уманский А.А., Темлянец М.В., Симачев А.С., Думова Л.В. Исследование влияния микроструктуры непрерывнолитых заготовок рельсовой стали К76Ф на сопротивление пластической деформации // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2020. № 2. С. 32–37.
  30. Уманский А.А., Кадыков В.Н., Мартыанов Ю.А. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при прокатке в сортовых калибрах // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2014. Т. 57. № 2. С. 10–14.
  - ing mill. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2015, vol. 60, no. 1, pp. 275–279. <http://doi.org/10.1515/amm-2015-0044>
  16. Kumar P., Singh A.P., Gupta I.N.P., Dubey P.K. Up-grading reheating furnaces at the rail & structural mill of Bhilai Steel Plant. *Steel Times International*. 2010, vol. 34, no. 2, pp. 38–42.
  17. Dong Y.-G., Zhang W.-Z., Song J.-F. Theoretical and experimental research on rolling force for rail hot rolling by universal mill. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2010, vol. 17, no. 1, pp. 27–32. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60040-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60040-4)
  18. Guo Y.-J., Xie Z.-J., Wang Y.-Z., Tao G.-M. Multiplex analytical method for metal three-dimensional flow of heavy rail rolling by universal mill. *Chongqing Daxue Xuebao / Journal of Chongqing University*. 2010, vol. 33, no. 1, pp. 31–35.
  19. Guo Y., Xie Z., Wang Y., Tao G., Yang Q. Study on optimization model of rolling parameters of high speed rail by universal mill. *Zhongguo Jixie Gongcheng / China Mechanical Engineering*. 2010, vol. 21, no. 10, pp. 1200–1202.
  20. Song J.-F., Zhang J.-T., Dong Y.-G. Theoretical and experimental research on the law of longitudinal flow in rail universal rolling. *Suxing Gongcheng Xuebao / Journal of Plasticity Engineering*. 2013, vol. 20, no. 3, pp. 10–15.
  21. Liu Y., Wang Y., Zhu H., Chen L.E. Effects of continuous rolling speed change rates on geometric dimension between two racks when rolling rail by universal pass. *Advanced Materials Research*. 2012, vol. 538–541, pp. 2941–2944. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.538-541.2941>
  22. Dong Y., Zhang W., Song J. Theoretical and experimental research on the elongation law of the rail in rail rolling by a universal mill. *Jixie Gongcheng Xuebao / Journal of Mechanical Engineering*. 2010, vol. 46, no. 6, pp. 87–92. <https://doi.org/10.3901/JME.2010.06.087>
  23. Dong Y., Zhang W., Song J. Theoretical and experimental research on the spread of the head of rail in rail rolling by a universal mill. *Zhongguo Jixie Gongcheng / China Mechanical Engineering*. 2009, vol. 20, no. 8, pp. 1004–1007.
  24. Kharlamov A.A., Lataev A.P., Galkin V.V., Ulanov P.V. Simulation of metal forming with the help of DEFORM package. *SAPR i grafika*. 2005, no. 5, pp. 2–4. (In Russ.).
  25. Oden J.T. *Finite Elements of Nonlinear Continua*. Dover Publications, 2006, 464 p.
  26. Kobayashi S., Oh S.-I., Altan T. *Metal Forming and the Finite-Element Method*. Oxford: Oxford University Press, 1989, 333 p.
  27. Umanskii A.A., Dorofeev V.V., Dumova L.V. Theoretical foundations for energy-efficient production of railway rails with improved performance properties. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 5, pp. 318–326. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-318-326>
  28. Umanskii A.A., Golovatenko A.V., Simachev A.S., Dorofeev V.V., Oskolkova T.N. Plasticity and deformation resistance of the alloyed rail steels in rolling temperature interval. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 6, pp. 452–460. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-6-452-460>
  29. Umanskii A.A., Temlyantsev M.V., Simachev A.S., Dumova L.V. Influence of microstructure of continuously cast billets of K76F rail steel on resistance to plastic deformation. *Problemy chernoi metallurgii i materialovedeniya*. 2020, no. 2, pp. 32–37. (In Russ.).
  30. Umanskii A.A., Kadykov V.N., Mart'yanov Yu.A. Mathematical modeling of the stress-strain state of the metal rolling in bar calibers. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014, vol. 57, no. 2, pp. 10–14. (In Russ.).

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Александр Александрович Уманский**, к.т.н., доцент, доцент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

**ORCID:** 0000-0003-4403-9006

**E-mail:** umanskii@bk.ru

**Алексей Борисович Юрьев**, д.т.н., ректор, Сибирский государственный индустриальный университет

**E-mail:** rector@sibsiu.ru

**Владимир Викторович Дорофеев**, д.т.н., главный калибровщик, АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»

**E-mail:** vladimir.dorofeev@evraz.com

**Любовь Валерьевна Думова**, старший преподаватель кафедры менеджмента и отраслевой экономики, Сибирский государственный индустриальный университет

**E-mail:** doumova@bk.ru

**Aleksandr A. Umanskii**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

**ORCID:** 0000-0003-4403-9006

**E-mail:** umanskii@bk.ru

**Aleksei B. Yur'ev**, Dr. Sci. (Eng.), Rector, Siberian State Industrial University

**E-mail:** rector@sibsiu.ru

**Vladimir V. Dorofeev**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Calibrator of Rail and Beam Shop, JSC "EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant"

**E-mail:** vladimir.dorofeev@evraz.com

**Lyubov' V. Dumova**, Senior Lecturer of the Chair "Management and Branch Economy", Siberian State Industrial University

**E-mail:** doumova@bk.ru

Поступила в редакцию 09.02.2021

После доработки 12.03.2021

Принята к публикации 17.03.2021

Received 09.02.2021

Revised 12.03.2021

Accepted 17.03.2021



Оригинальная статья

УДК 504.06

DOI 10.17073/0368-0797-2021-8-561-571



## ВЛИЯНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ НА КАЧЕСТВО АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА КАК ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ. СООБЩЕНИЕ 2

О. В. Глушакова, О. П. Черникова

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

**Аннотация.** Принятие ООН целей в области устойчивого развития до 2030 г. послужило импульсом для разработки и введения в действие в Российской Федерации нормативных правовых актов, направленных на охрану окружающей среды, включая соответствующие финансовые механизмы. Задача снижения уровня загрязнения атмосферного воздуха выделена в программных документах ООН в качестве одной из приоритетных. К наиболее проблемным в плане загрязнения атмосферного воздуха в России относятся 12 городов, в семи из которых функционируют предприятия черной металлургии. Проблемы экологического развития крупных промышленных центров сохраняются, несмотря на реализацию с 2012 г. государственной программы Российской Федерации «Охрана окружающей среды», а с 2019 г. – национального проекта «Экология», введение в действие системы квотирования выбросов загрязняющих веществ, определение перечня компенсационных мероприятий и создание федеральной государственной информационной системы мониторинга качества атмосферного воздуха. В таких городах, как Красноярск и Новокузнецк средняя фактическая годовая концентрация некоторых загрязняющих веществ, которые относятся к высокотоксичным и канцерогенным веществам I и II классов опасности, превышает предельно допустимую концентрацию в 5 – 6 раз. Проанализировано содержание докладов профильных органов государственной власти регионального уровня о состоянии и охране окружающей среды. Сделан вывод об отсутствии единства методических подходов к представлению в докладах аналитической информации о состоянии и качестве атмосферного воздуха, а также несвоевременности публикации самих докладов. Выявлен факт инерционности институциональной среды в плане включения в принимаемые нормативные правовые акты неактуальных норм, и как следствие – возникновение расходных обязательств бюджетов, реальная потребность в которых отсутствует. Установлен факт несоставления крупными предприятиями черной металлургии (ПАО «Челябинский металлургический комбинат» (Мечел) и ООО «Красноярский металлургический завод»), функционирующими в городах с очень высоким и высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха, корпоративной нефинансовой отчетности в формате GRI.

**Ключевые слова:** цели устойчивого развития, уровень загрязнения, качество атмосферного воздуха, выбросы загрязняющих веществ, состояние и охрана окружающей среды, предельно допустимая концентрация загрязняющих веществ, корпоративная нефинансовая отчетность

**Для цитирования:** Глушакова О.В., Черникова О.П. Влияние предприятий черной металлургии на качество атмосферного воздуха как экологической составляющей устойчивого развития территорий. Сообщение 2 // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 8. С. 561–571. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-561-571>

Original article

## INFLUENCE OF FERROUS METALLURGY ENTERPRISES ON ATMOSPHERIC AIR QUALITY AS AN ECOLOGICAL COMPONENT OF TERRITORIES SUSTAINABLE DEVELOPMENT. REPORT 2

O. V. Glushakova, O. P. Chernikova

■ Siberian State Industrial University (42 Kirov Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

**Abstract.** The adoption of the UN Sustainable Development Goals until 2030 served as an impulse for development and implementation of regulatory legal acts aimed at environmental protection in the Russian Federation, including appropriate financial mechanisms. The task of reducing level of air pollution is highlighted in the UN program documents as one of the priorities. The most problematic in terms of air pollution in Russia are 12 cities, seven of which have ferrous metallurgy enterprises. The problems of ecological development of large industrial centers remain (despite the implementation of the state program of the Russian Federation “Environmental Protection” since 2012, and the national project “Ecology” since 2019) introduction of a quota system for pollutant emissions substances, determination of the list of compensatory measures and creation of the federal information system for atmospheric air quality monitoring. In cities such as Krasnoyarsk and Novokuznetsk, the average actual annual concentration of some pollutants, which are highly toxic and carcinogenic substances of I and II hazard classes, exceeds the permissible maximum by 5 – 6 times. We have analyzed content of the reports of the specialized state authorities at the regional level on state and protection of environment. It is concluded

that there is no unity of methodological approaches to presentation of analytical information on state and quality of atmospheric air in reports, as well as untimely publication of the reports themselves. The fact of inertia of the institutional environment was revealed in terms of including irrelevant norms in the adopted legal acts, and as a consequence – emergence of expenditure obligations of budgets, without real need for them. It was established that large enterprises of ferrous metallurgy (Chelyabinsk Metallurgical Plant PJSC (Mechel) and Krasnoyarsk Metallurgical Plant LLC), operating in cities with very high levels of air pollution, did not draw up corporate non-financial reporting in the GRI format.

**Keywords:** sustainable development goals, pollution level, air quality, pollutants emissions, state and protection of the environment, maximum permissible concentration of pollutants, corporate non-financial reporting

**For citation:** Glushakova O.V., Chernikova O.P. Influence of ferrous metallurgy enterprises on atmospheric air quality as an ecological component of territories sustainable development. Report 2. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 8, pp. 561–571. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-561-571>

## ВВЕДЕНИЕ

В 2018 г. Президентом впервые сформулированы национальные цели (о национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 г. – Указ Президента РФ от 07.05.2018 г. № 204 (ред. от 21.07.2020)) развития России. В 2020 г. их содержание было уточнено и расширен временной горизонт их достижения для обеспечения соответствия целям в области устойчивого развития до 2030 г., сформулированным ООН (Указ Президента РФ от 21.07.2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 г.»). Позитивно, что национальные цели развития России отвечают содержанию Концепции устойчивого развития, принятой в 1992 г. в Рио-де Жанейро (обеспечение экономической, экологической и социальной устойчивости) и направлены на сохранение населения, обеспечение здоровья и благополучия людей, создание возможностей для самореализации и развития талантов, обеспечение комфортной и безопасной среды для жизни, создание условий для достойного, эффективного труда и успешного предпринимательства.

Для достижения цели «Комфортная и безопасная среда для жизни» предусмотрено снижение в два раза выбросов опасных загрязняющих веществ, оказывающих наибольшее негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека, что подразумевает необходимость решения проблемы загрязнения атмосферного воздуха в промышленных городах, где функционируют предприятия черной металлургии.

Степень загрязнения атмосферного воздуха оценивается при сравнении фактических концентраций с предельно допустимыми концентрациями (ПДК) загрязняющих веществ для населенных территорий. Рассчитываются также среднесуточная ПДК (ПДК<sub>с.с.</sub>), среднегодовая ПДК (ПДК<sub>с.г.</sub>), ПДК максимальная разовая (ПДК<sub>м.р.</sub>). Для оценки степени загрязнения воздуха используют комплексные индексы, например, комплексный индекс загрязнения атмосферы (ИЗА), учитывающий несколько примесей; стандартный индекс (СИ) как отношение наибольшей измеренной разовой концентрации примеси к ПДК<sub>м.р.</sub>, определяемой из данных наблюдений на станции за одной примесью или на всех станциях рассматриваемой территории за всеми приме-

сями за месяц или за год. При оценке степени загрязнения атмосферного воздуха рассчитывается показатель наибольшей повторяемости (НП), представляющий собой процент от ПДК<sub>м.р.</sub> по данным наблюдений за одной примесью на всех станциях города за месяц или за год.

К показателям, рекомендованным ООН, относится негативное экологическое воздействие городов в пересчете на душу населения. Некоторые профильные органы государственной власти регионального уровня, придерживаясь рекомендаций ООН, рассчитывают показатель антропогенной нагрузки, представляющий собой количество выбросов загрязняющих веществ, отходящих от стационарных источников, в расчете на душу населения.

Уровень загрязнения считается повышенным при ИЗА от 5 до 6, СИ < 5, НП < 20 %, высоким при ИЗА от 7 до 13, СИ от 5 до 10, НП от 20 до 50 % и очень высоким при ИЗА ≥ 14, СИ > 10, НП > 50 % [1].

Аналитическая информация о состоянии окружающей среды, в том числе атмосферного воздуха, в региональном разрезе, а также в разрезе муниципальных образований, в сжатом виде публикуется на официальном сайте Росстата. Однако аналитика в разрезе ПДК загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и ее превышения, НП, СИ, ИЗА для конкретных территорий на официальном сайте Росстата не раскрывается. Обязанность за предоставление наиболее полной аналитической информации о состоянии и охране окружающей среды с обязательной публикацией ежегодных докладов возложена на профильные органы государственной власти регионального уровня [1 – 6]. Обработка и обобщение данных о загрязнении атмосферы и оценка уровня загрязнения проводятся в соответствии с действующим в России экологическим законодательством [7], а также Руководящим документом РД 52.04.667 – 2005 «Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению, содержанию».

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование базируется на диалектическом и институциональном подходах. Диалектический подход позволяет подойти к исследованию процессов и явле-

ний в движении и развитии, а институциональный – выявить этапы развития регуляторной среды, направленной на обеспечение экологической составляющей устойчивого развития территорий и снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха. В процессе изучения и обобщения аналитических материалов профильных органов государственной власти регионального уровня использованы методы анализа, синтеза, сравнения, группировки.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предприятия черной металлургии оказывают существенное антропогенное воздействие на окружающую среду. Речь идет не только о создании парникового эффекта, но и о выбросах в атмосферу загрязняющих веществ, представляющих опасность для жизни и здоровья человека.

Вклад в загрязнение атмосферного воздуха стационарных и передвижных источников в субъектах РФ, в которых функционируют предприятия черной металлургии, представлен в табл. 1. Самый большой вклад в загрязнение атмосферного воздуха от стационарных источников в 2018 г. был в Красноярском крае (89,6 %), на втором месте – Кемеровская область – Кузбасс (85,5 %), на третьем – Липецкая область (69,5 %). В докладах о состоянии и охране окружающей среды профильных органов государственной власти Свердловской и Вологодской областей информация в подобном аналитическом разрезе не представлена.

Необходимо отметить, что в рассмотренных докладах [1 – 6] отсутствует единство методических подходов к предоставлению аналитической информации, что очень сильно затрудняет возможность ее сопоставления. Так, к существенным показателям относятся количество проб атмосферного воздуха за год, а также количество проб атмосферного воздуха с превышением ПДК. Подобного рода информация представлена только в Докладах Министерства природных ресурсов и экологии Кемеровской области – Кузбасса и Министерства экологии Челябинской области. Однако в указанных докладах отсутствуют результаты оценки таких комплексных индексов загрязнения атмосферного воздуха, как СИ и НП.

Как уже было отмечено, широко используемым в международной практике выступает показатель антропогенной нагрузки в расчете на душу населения, однако большинство профильных органов государственной власти регионального уровня этот показатель не рассчитывают (табл. 1). Исключение составляют доклады Министерства природных ресурсов и экологии Кемеровской области – Кузбасса, в которых информация об антропогенной нагрузке представлена в разрезе муниципальных образований. Для таких городских округов, как Челябинск, Магнитогорск, Красноярск, Нижний Тагил, Липецк, Череповец показатель антропо-

погенной нагрузки рассчитан в настоящей работе самостоятельно (табл. 2). Подобного рода оценки являются принципиальными, поскольку ряд загрязняющих веществ как результат деятельности предприятий черной металлургии относится к высокотоксичным и канцерогенным веществам I и II классов опасности. Несвоевременность предоставления докладов или непредоставление информации об объеме выбросов загрязняющих веществ, отходящих от стационарных источников, в разрезе муниципальных образований профильными органами государственной власти регионального уровня – еще одна из проблем, затрудняющая анализ ситуации в крупных промышленных центрах черной металлургии (табл. 2).

Несмотря на старт Федерального проекта «Чистый воздух» в составе национального проекта «Экология» в октябре 2018 г., в рамках которого была поставлена задача по снижению выбросов загрязняющих веществ в крупных промышленных центрах, в том числе в которых функционируют предприятия черной металлургии, уже по итогам 2018 г. можно отметить снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха по сравнению с 2017 г. в Челябинске – с высокого до повышенного, в Магнитогорске – с очень высокого до высокого, в Нижнем Тагиле – с высокого до низкого, в Череповце – с повышенного до низкого (табл. 3). В городе Липецк согласно информации, представленной в докладе Управления экологии и природных ресурсов Липецкой области, уже в 2017 г. уровень загрязнения атмосферного воздуха оценивали как низкий (табл. 3), что вызывает вопрос о необходимости его включения в перечень крупных промышленных центров с высоким и очень высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха и выделения бюджетных ассигнований из федерального бюджета. Такая ситуация с одной стороны демонстрирует инерционность институциональной среды, когда в принимаемых нормативных правовых актах содержатся уже неактуальные нормы, а с другой стороны – инерционность участников бюджетного процесса, которые при планировании бюджетных ассигнований ориентируются на действующее законодательство и вытекающие из него расходные обязательства бюджетов.

Что касается города Новокузнецк, то уровень загрязнения атмосферного воздуха в 2017 – 2019 гг. оценивался в нем как очень высокий. Аналогичная ситуация в 2017 – 2018 гг. наблюдалась и в городе Красноярск (табл. 3). За 2019 г. доклад о состоянии и охране окружающей среды на официальном сайте Министерства экологии и рационального природопользования Красноярского края не представлен (табл. 2).

Одним из показателей, характеризующих степень загрязнения атмосферного воздуха, выступает показатель среднегодовой концентрации загрязняющих веществ (ПДК<sub>с.г.</sub>). В целом по ряду загрязняющих веществ (табл. 4, 5) наблюдается снижение среднегодовой концентрации, в том числе по такому опасному

Состояние атмосферного воздуха в субъектах РФ и показатели контроля качества атмосферного воздуха  
 Table 1. State of atmospheric air in the constituent entities of the Russian Federation and indicators of air quality control

| Регион                            | Вклад в загрязнение атмосферного воздуха по годам от |                                 |         |          |          | Уловлено и обезврежено загрязняющих веществ, %, отходящих от стационарных источников |      |      | Показатели контроля качества атмосферного воздуха, используемые в докладах профильными органами государственной власти |  |
|-----------------------------------|--|---------------------------------|---------|----------|----------|--|------|------|--|--|
|                                   | передвижных источников, тыс. т                       | стационарных источников, тыс. т | 2017    | 2018     | 2019     | 2017   | 2018 | 2019 |  |  |
| Кемеровская область – Кузбасс [1] | 231,2  | 235,2                           | н/д     | 1487,648 | 1383,065 | н/д  | 74,8 | 72,6 | н/д  | Количество проб атмосферного воздуха; количество проб атмосферного воздуха с превышением ПДК; среднегодовая концентрация загрязняющих веществ в долях ПДК; показатель антропогенной нагрузки |
| Челябинская область [2]           | 305,7  | 344,5                           | 99,7827 | 532,722  | 486,486  | 457,060  | 84,8 | 82,0 | н/д  | Среднегодовая концентрация загрязняющих веществ в долях ПДК, ПДК максимальная разовая, ПДК среднесуточная, ИЗА, СИ, НП   |
| Свердловская область [3]          | н/д  | н/д                             | н/д     | 928      | 857      | н/д  | 88,7 | 88,9 | н/д  | Среднегодовая концентрация загрязняющих веществ в долях ПДК, ПДК максимальная разовая, ПДК среднесуточная, ИЗА, СИ, НП   |
| Красноярский край [4]             | 259  | 267                             | н/д     | 2369,5   | 2319     | н/д  | 73,1 | 73,4 | н/д  | Среднегодовая концентрация загрязняющих веществ в долях ПДК, ПДК максимальная разовая, ИЗА, СИ, НП   |
| Вологодская область [5]           | н/д  | н/д                             | н/д     | 429      | 399      | н/д  | 83,3 | 85,4 | н/д  | Среднегодовая концентрация загрязняющих веществ в долях ПДК, ИЗА   |
| Липецкая область [6]              | 153,0  | 143,9                           | н/д     | 326,4    | 326,4    | н/д  | 81,8 | 82,1 | н/д  | Среднегодовая концентрация загрязняющих веществ в долях ПДК, Среднемесячная концентрация в долях ПДК, ПДК максимальная разовая, ПДК среднесуточная, СИ, НП*                                  |

Примечание. \* – показатель НП в соответствии с письмом руководителя Ростидромета А.В. Фролова от 19 апреля 2013 г. № 140 – 02304/13 при оценке уровня загрязнения указывается только категория качества (то есть без указания количественных значений показателей ИЗА).

**Антропогенная нагрузка в городских округах с высоким и очень высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха**

*Table 2. Anthropogenic load in urban districts with high and very high levels of air pollution*

| Город        | Объем выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников по годам, тыс. т |         |  | Антропогенная нагрузка по годам, кг/человека |                                  |      |
|--------------|---|---------|--|--|----------------------------------|------|
|              | 2017  | 2018    | 2019   | 2017   | 2018                             | 2019 |
| Новокузнецк  | 313,330   | 295,794 | 294,195  | 566  | 536                              | 535  |
| Челябинск    | 144,168   | 135,959 | 116,920  | 120*   | 113*                             | 97*  |
| Магнитогорск | 210,153   | 203,206 | 191,931  | 502*   | 484*                             | 464* |
| Красноярск   | 117,6   | 116,0   | Доклад не представлен на официальном сайте Министерства экологии и рационального природопользования Красноярского края | 200,0*                                       | 200,0*                           | н/д  |
| Нижний Тагил | 138,808   | н/д     | Доклад не представлен на официальном сайте Министерства экологии и природных ресурсов Свердловской области             | 386,94*                                      | Данные в докладе не представлены | н/д  |
| Липецк       | 286,03  | 286,02  | Доклад не представлен на официальном сайте Управления экологии и природных ресурсов Липецкой области                   | 560,36*                                      | 561,11*                          | н/д  |
| Череповец    | 318,36  | н/д     | н/д  | 998,44*                                      | н/д                              | н/д  |

Пр и м е ч а н и е. \* – показатели, рассчитанные авторами настоящей работы самостоятельно.

**Изменение уровня загрязнения атмосферного воздуха в городских округах Российской Федерации**

*Table 3. Changes in the level of air pollution in urban districts of the Russian Federation*

| Город        | Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха в |               |  |
|--------------|--|---------------|--|
|              | 2017 г.  | 2018 г.       | 2019 г.  |
| Новокузнецк  | Очень высокий                                    | Очень высокий | Очень высокий  |
| Челябинск    | Высокий  | Повышенный    | Повышенный   |
| Магнитогорск | Очень высокий                                    | Высокий       | Высокий  |
| Красноярск   | Очень высокий                                    | Очень высокий | Доклад не представлен на официальном сайте Министерства экологии и рационального природопользования Красноярского края |
| Нижний Тагил | Высокий  | Низкий        | Доклад не представлен на официальном сайте Министерства экологии и природных ресурсов Свердловской области             |
| Липецк       | Низкий   | Низкий        | Доклад не представлен на официальном сайте Управления экологии и природных ресурсов Липецкой области                   |
| Череповец    | Повышенный                                       | Низкий        | Низкий   |

веществу, как бенз(а)пирен. Исключение составляет только город Красноярск, где в 2018 г. зафиксирован рост этого показателя (табл. 4). Вместе с тем средняя фактическая концентрация за год бенз(а)пирена превысила предельно допустимую в городе Новокузнецк в 2019 г. в 5,8 раза, в городе Красноярск в 2018 г. – в 6,8 раза (табл. 4).

Устойчивое развитие территории возможно обеспечить, если установленных институциональных рамок будут придерживаться все заинтересованные стороны (власть, бизнес и общество). Приверженность Рос-

сии Концепции устойчивого развития и прежде всего ее экологической компоненте раскрывается через принятие ряда институциональных норм [7] (табл. 2), выделение бюджетных ассигнований на охрану окружающей среды, публикацию информации о состоянии и охране окружающей среды соответствующими профильными министерствами (ведомствами) федерального и регионального уровня. На микроуровне демонстрация ответственности за результаты своей деятельности обеспечивается посредством раскрытия информации о результатах деятельности компании в соответствии

Т а б л и ц а 4

Среднегодовые концентрации загрязняющих веществ

Table 4. Average annual concentrations of pollutants

| Наименование загрязняющего вещества | Среднегодовая концентрация загрязняющих веществ по годам в |      |      |            |      |      |               |      |      |             |      |      |
|-------------------------------------|--|------|------|------------|------|------|---------------|------|------|-------------|------|------|
|                                     | Новокузнецке   |      |      | Челябинске |      |      | Магнитогорске |      |      | Красноярске |      |      |
|                                     | 2017   | 2018 | 2019 | 2017       | 2018 | 2019 | 2017          | 2018 | 2019 | 2017        | 2018 | 2019 |
| Бенз(а)пирен                        | 6,0  | 6,8  | 5,8  | 3,1        | 2,03 | 1,8  | 5,70          | 2,5  | 1,90 | 5,00        | 6,80 | н/д  |
| Взвешенные вещества                 | 0,9  | 1,0  | 1,0  | –          | –    | –    | 2,30          | 1,5  | 1,20 | 0,75        | 0,68 | н/д  |
| Водород фтористый                   | 0,8  | 0,8  | 0,9  | 1,0        | 0,80 | 1,5  | –             | –    | –    | –           | –    | н/д  |
| Диоксид азота                       | 0,8  | 0,6  | 0,7  | 0,8        | 0,80 | –    | 0,99          | –    | –    | 0,75        | 0,90 | н/д  |
| Формальдегид                        | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,9        | 1,08 | –    | 1,60          | 1,6  | 1,60 | 1,70        | 1,80 | н/д  |
| Оксид углерода                      | 0,3  | 0,5  | 0,4  | –          | –    | –    | 1,10          | 1,5  | –    | 0,44        | 0,40 | н/д  |
| Аммиак                              | 0,4  | 0,4  | 0,6  | –          | –    | –    | 1,30          | 1,2  | –    | 0,06        | 0,19 | н/д  |
| Фенол                               | 0,3  | 0,4  | 0,3  | –          | –    | –    | 1,10          | –    | –    | –           | –    | н/д  |
| Оксид азота                         | 0,2  | 0,2  | 0,2  | 0,8        | –    | –    | –             | 1,5  | –    | 0,34        | 0,22 | н/д  |
| Диоксид серы                        | 0,2  | 0,1  | 0,1  | –          | –    | –    | –             | –    | 0,23 | 0,26        | –    | н/д  |
| Сажа (углерод)                      | 0,3  | 0,3  | 0,3  | –          | –    | –    | –             | –    | –    | –           | –    | н/д  |
| Пыль                                | –  | –    | –    | –          | –    | –    | –             | –    | –    | –           | –    | н/д  |

Т а б л и ц а 5

Среднегодовые концентрации загрязняющих веществ

Table 5. Average annual concentrations of pollutants

| Наименование загрязняющего вещества | Среднегодовая концентрация загрязняющих веществ по годам в |      |      |        |      |      |           |       |       |
|-------------------------------------|--|------|------|--------|------|------|-----------|-------|-------|
|                                     | Нижний Тагил   |      |      | Липецк |      |      | Череповец |       |       |
|                                     | 2017   | 2018 | 2019 | 2017   | 2018 | 2019 | 2017      | 2018  | 2019  |
| Бенз(а)пирен                        | –  | –    | н/д  | –      | –    | н/д  | 0,70      | 0,50  | –     |
| Взвешенные вещества                 | 0,23   | –    | н/д  | –      | –    | н/д  | –         | –     | –     |
| Водород фтористый                   | –  | –    | н/д  | –      | –    | н/д  | –         | –     | –     |
| Диоксид азота                       | 0,22   | –    | н/д  | 0,4    | 0,5  | н/д  | –         | 0,520 | 0,340 |
| Формальдегид                        | –  | –    | н/д  | 0,8    | 0,9  | н/д  | 0,70      | 0,910 | 0,870 |
| Оксид углерода                      | 0,09   | –    | н/д  | 0,1    | 0,2  | н/д  | 0,40      | 0,310 | 0,260 |
| Аммиак                              | 0,10   | –    | н/д  | –      | –    | н/д  | 0,30      | 0,480 | 0,520 |
| Фенол                               | –  | –    | н/д  | 0,3    | 0,4  | н/д  | –         | 0,420 | 0,360 |
| Оксид азота                         | 0,12   | –    | н/д  | 0,1    | 0,1  | н/д  | –         | 0,180 | 0,130 |
| Диоксид серы                        | 0,30   | –    | н/д  | 0,1    | 0,1  | н/д  | 0,04      | 0,020 | –     |
| Сажа (углерод)                      | –  | –    | н/д  | –      | –    | н/д  | –         | 0,013 | 0,033 |
| Пыль                                | –  | –    | н/д  | 0,8    | 0,5  | н/д  | 0,50      | 0,610 | 0,680 |

со стандартами GRI и публикацией нефинансовых отчетов.

Компании многих стран мира формируют нефинансовую отчетность. Во Франции законом Grenelle II введены требования к содержанию нефинансовой отчетности. Компании с численностью сотрудников более 500 человек обязаны ежегодно выпускать социальный и экологический отчеты, начиная с 31 декабря 2013 г.

Компании должны раскрывать информацию по 42 направлениям о своей деятельности, характеризующим уровень их социальной ответственности (занятость, трудовые отношения, здоровье и безопасность, социальные последствия, отношения с заинтересованными сторонами, права человека) и воздействие на окружающую среду (загрязнение и управление отходами, потребление энергии). Требования к раскрытию социальной

и экологической информации отражают содержание основных международных руководящих принципов отчетности в области устойчивого развития, в том числе Глобальной инициативы по отчетности (GRI).

Внимание научного сообщества к формированию компаниями нефинансовой отчетности обусловлено нарастанием проблем экологического характера и усиления антропогенного давления на окружающую среду.

Изучением мотивов для принятия компанией факта необходимости раскрытия информации об устойчивости занимался N. Finch [8], который полагал, что основная мотивация для компаний, применяющих в отчетности принципы в области устойчивого развития, заключается в желании сообщить своим стейкхолдерам об эффективности управления с точки зрения возможности достижения долгосрочных корпоративных выгод (улучшение финансовых показателей, повышение конкурентных преимуществ, максимизация прибыли и долгосрочный успех компании).

Результаты исследования взаимосвязи показателей устойчивости компаний с их финансовыми показателями, а также соответствия публикуемых ими отчетов об устойчивом развитии руководящим принципам Глобальной инициативы по отчетности (GRI) представлены в работе [9]. Аналогичной проблематике посвящено исследование [10]. Оценкой перспектив развития Глобальной инициативы по отчетности (GRI) в плане качества осуществления компаниями учета в области устойчивости занимались в работе [11]. Результаты анализа экологической отчетности, формируемой международными компаниями по новым стандартам GRI, представлены в работе [12]. Изучением содержания отчетов в формате GRI в целях исследования практики экологического менеджмента и результатов деятельности компаний Швеции занимались в работе [13]. В работе [14] отражены результаты исследования взаимосвязи между соответствием раскрытия информации в корпоративной социальной отчетности стандартам GRI и финансовыми показателями компаний обрабатывающей промышленности. Анализ организационной структуры компаний на базе отчетов GRI с целью выявления лучших практик корпоративной приверженности делу сохранения биоразнообразия посвящено исследование [15]. Результаты исследования роли независимых директоров и их решений в отношении раскрытия информации о корпоративной социальной ответственности компаний представлены в работах [16, 17]. Оценкой корпоративного экологического профиля компаний путем анализа отчетов о корпоративной социальной ответственности занимались в работе [18]. Результаты анализа типов показателей экологической результативности, представленных в отчетах об устойчивом развитии компаниями-лидерами в области устойчивого развития в Канаде, отражены в работе [19]. Анализ содержания обязательной социальной и экологической отчетности во Франции приведен в работе [20]. Ме-

тодология измерения производственных возможностей «зеленой экономики» представлена в работе [21]. В работе [22] обоснована необходимость разработки социальной отчетности для удовлетворения потребностей всех заинтересованных сторон.

В России внимание исследователей сконцентрировано на различного рода проблематике применения стандартов GRI в деятельности компаний. В работе [23] исследовали вопрос повышения стоимости компаний при условии составления нефинансовых отчетов в формате GRI. Необходимости поддержки соответствия стандартам GRI и ISO нефинансовой отчетности компаний посвящена работа [24]. Результаты исследования вопросов соблюдения принципов GRI в системе отчетности устойчивого развития отражены в работе [25]. Исследованием понимания содержания устойчивого развития энергетическими компаниями России занимались в работе [26]. Этапы эволюции корпоративной социальной отчетности российских предприятий представлены в работе [27]. Международные модели регулирования отчетности об устойчивом развитии предприятия рассмотрены в работе [28]. Аргументация о необходимости использования корпоративной отчетности как инструмента повышения эффективности деятельности компании представлена в работе [29].

В России в металлургической и горнодобывающей промышленности начало практике составления корпоративных нефинансовых отчетов было положено в 2000 г. Изначально это были исключительно отчеты в области социальной ответственности. В формировании подобного рода отчетов в 2000 – 2004 гг. приняло участие семь крупных российских компаний. Из них только одна занималась производством продукции для сталелитейного рынка (Череповецкий металлургический комбинат), активы которой ныне принадлежат ПАО «Северсталь». Однако в дальнейшем необходимость обеспечения устойчивости развития бизнеса, борьба за рынки сбыта и поставщиков сырья потребовала демонстрации не только социально ответственной позиции, но и формирования другого рода отчетов (интегрированных, отчетов в области устойчивого развития, экологических). Согласно данным Национального регистра корпоративных нефинансовых отчетов в процесс формирования корпоративной нефинансовой отчетности, начиная с 2000 г., включены 180 российских компаний. В металлургической и связанной с ней горнодобывающей отраслях по состоянию на 24 октября 2019 г. эти отчеты формируют 20 компаний. Приверженность предприятий черной металлургии политике устойчивого развития, функционирующих в крупных промышленных городах России, включенных в перечень городов с высоким и очень высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха, отражена в табл. 6. В Национальном регистре корпоративных нефинансовых отчетов не представлены отчеты таких крупных предприятий черной металлургии, как

**Сведения о формировании корпоративной нефинансовой отчетности предприятиями черной металлургии, функционирующими в городах с очень высоким и высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха**

*Table 6. Information on corporate non-financial reporting of ferrous metallurgy enterprises operating in cities with very high and high levels of air pollution*

| Регион                        | Город        | Наименование предприятия черной металлургии                         | Демонстрация приверженности к политике устойчивого развития посредством составления и публикации на сайте РСПП нефинансовых отчетов        |
|-------------------------------|--------------|---|--|
| Вологодская область           | Череповец    | Череповецкий металлургический комбинат (ПАО «Северсталь»)           | 2004 – 2006 гг. социальные отчеты (СО);<br>2010 – 2011 гг. (СО);<br>2012 – 2018 гг. социальная ответственность и устойчивое развитие (СУР) |
| Кемеровская область – Кузбасс | Новокузнецк  | АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» | 2018 – 2019 гг. (СУР)<br>GRI 102 – 45  |
| Красноярский край             | Красноярск   | ООО «Красноярский металлургический завод»                           | –  |
| Липецкая область              | Липецк       | ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»                        | 2006 – 2012 гг. (СО);<br>2013 – 2014 гг. (СО, экологические отчеты (ЭО))<br>2015 – 2018 гг. (СУР)  |
| Свердловская область          | Нижний Тагил | АО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат»                | 2018 – 2019 гг. (СУР)<br>GRI 102 – 45  |
| Челябинская область           | Челябинск    | ПАО «Челябинский металлургический комбинат» (Мечел)                 | –  |
|                               | Магнитогорск | ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»                      | 2005 – 2014 и 2016 – 2017 гг. (СО)   |

Примечание. СО – социальная отчетность; СУР – отчетность в области устойчивого развития; ЭО – экологическая отчетность.

ООО «Красноярский металлургический завод» и ПАО «Челябинский металлургический комбинат» (Мечел) (табл. 6).

## Выводы

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о существенном влиянии предприятий черной металлургии на экологическую составляющую устойчивого развития территорий. Несмотря на формирование обширного нормативно-правового поля в области охраны окружающей среды и введение в действие системы квотирования выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, проблемы экологического развития крупных промышленных центров России продолжают сохраняться.

Публикуемые на официальных сайтах региональных профильных органов государственной власти доклады о состоянии и охране окружающей среды отличаются разным уровнем аналитичности и отсутствием единства методических подходов к представлению информации о состоянии и качестве атмосферного

воздуха. В большинстве докладов не представлена информация об антропогенной нагрузке в расчете на душу населения (показателе, рекомендуемом ООН), а также количестве проб атмосферного воздуха, в том числе количестве проб с превышением ПДК. Выявлен факт инерционности институциональной среды в плане включения в принимаемые нормативные правовые акты неактуальных норм и как следствие – возникновение расходных обязательств бюджетов, реальная потребность в которых отсутствует. Несмотря на существенное воздействие результатов своей деятельности на уровень загрязнения атмосферного воздуха такие предприятия черной металлургии, как ПАО «Челябинский металлургический комбинат» (Мечел) и ООО «Красноярский металлургический завод» не составляют корпоративную нефинансовую отчетность в формате GRI.

Достижение целей устойчивости возможно обеспечить только посредством формирования у всех субъектов социально-экономических отношений (власти, бизнеса и общества) не формального, а реального уровня ответственности за устойчивое развитие конкретной территории.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Официальный сайт Министерства природных ресурсов и экологии Кузбасса. Доклады о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области – Кузбасса. [Электронный ресурс]. URL: <http://kuzbasseco.ru/doklady/o-sostoyanii-okruzhayushhej-sredy-kemerovskoj-oblasti/> (дата обращения: 26.07.2021 г.).
2. Официальный сайт Министерства экологии Челябинской области. Доклады об экологической ситуации в Челябинской области. [Электронный ресурс]. URL: <http://kuzbasseco.ru/doklady/o-sostoyanii-okruzhayushhej-sredy-kemerovskoj-oblasti/> (дата обращения: 26.07.2021 г.).
3. Официальный сайт Министерства природных ресурсов и экологии Свердловской области. Государственные доклады «О состоянии и охране окружающей среды Свердловской области». [Электронный ресурс]. URL: <https://mprso.midural.ru/article/show/id/1126> (дата обращения: 26.07.2021 г.).
4. Официальный сайт Министерства экологии и рационального природопользования Красноярского края. Государственные доклады «О состоянии и охране окружающей среды в Красноярском крае». [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mpr.krskstate.ru/envir/page5849> (дата обращения: 26.07.2021 г.).
5. Официальный сайт Департамента природных ресурсов и охраны окружающей среды Вологодской области. Доклады о состоянии и охране окружающей среды Вологодской области. [Электронный ресурс]. URL: <https://dpr.gov35.ru/deyatelnost/deyatelnost-strukturnykh-podrazdeleniy/sostoyanie-okruzhayushchey-sredy/> (дата обращения: 26.07.2021 г.).
6. Официальный сайт Управления экологии и природных ресурсов Липецкой области. Доклады о состоянии и охране окружающей среды Липецкой области. [Электронный ресурс]. URL: <http://ekolip.ru/folder1/> (дата обращения 26.07.2021 г.).
7. Глушакова О.В., Черникова О.П. Влияние предприятий черной металлургии на качество атмосферного воздуха как экологической составляющей устойчивого развития территорий. Сообщение 1 // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 4. С. 292–301. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-292-301>
8. Finch N. The Motivations for Adopting Sustainability Disclosure (August 2005) // MGSM Working Paper No. 2005-17. Available at URL: <https://ssrn.com/abstract=798724> (дата обращения 26.07.2021 г.).
9. Nazim H. Impact of Sustainability Performance on Financial Performance: An Empirical Study of Global Fortune (N100) Firms (June 10, 2015) // Department of Management, Università Ca' Foscari Venezia Working Paper No. 2015/01. Available at URL: <https://ssrn.com/abstract=2616835> (Accessed 26.07.2021).
10. Erina M.T., Rashid A. Relationship between Corporate Sustainability Practices and Financial Performance: Evidence from the GRI Reporting Companies (September 25, 2012). Available at URL: <https://ssrn.com/abstract=2152124> (Accessed 26.07.2021).
11. Oba V., Ibikunle J. Issues in Sustainability Accounting: A Global Reporting Initiative Perspective (January 2, 2015). Available at URL: <https://ssrn.com/abstract=2544555> (Accessed 26.07.2021).
12. Gallego-Álvarez I., Lozano M.B., Rodríguez-Rosa M. An analysis of the environmental information in international companies according to the new GRI standards // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 182. P. 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.240>
13. Chen L., Tang O., Feldmann A. Applying GRI reports for the investigation of environmental management practices and company performance in Sweden, China and India // Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 98. P. 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.001>
14. Chen L., Feldmann A., Tang O. The relationship between disclosures of corporate social performance and financial performance:
1. Official site of the Ministry of Natural Resources and Ecology of Kuzbass. Reports on the state and protection of the environment of the Kemerovo region – Kuzbass. Available at URL: <http://kuzbasseco.ru/doklady/o-sostoyanii-okruzhayushhej-sredy-kemerovskoj-oblasti/> (Accessed 26.07.2021). (In Russ.).
2. Official site of the Ministry of Ecology of the Chelyabinsk region. Reports on the ecological situation in the Chelyabinsk region. Available at URL: <http://kuzbasseco.ru/doklady/o-sostoyanii-okruzhayushhej-sredy-kemerovskoj-oblasti/> (Accessed 26.07.2021). (In Russ.).
3. Official site of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Sverdlovsk Region. State reports “On the state and protection of the environment of the Sverdlovsk region”. Available at URL: <https://mprso.midural.ru/article/show/id/1126> (Accessed 26.07.2021). (In Russ.).
4. Official site of the Ministry of Ecology and Rational Nature Management of the Krasnoyarsk Territory. State reports “On the state and protection of the environment in the Krasnoyarsk Territory”. Available at URL: <http://www.mpr.krskstate.ru/envir/page5849> (Accessed 26.07.2021). (In Russ.).
5. Official site of the Department of Natural Resources and Environmental Protection of the Vologda Region. Reports on the state and protection of the environment in the Vologda Region. Available at URL: <https://dpr.gov35.ru/deyatelnost/deyatelnost-strukturnykh-podrazdeleniy/sostoyanie-okruzhayushchey-sredy/> (Accessed 26.07.2021). (In Russ.).
6. Official site of the Department of Ecology and Natural Resources of the Lipetsk Region. Reports on the state and protection of the environment of the Lipetsk region. Available at URL: <http://ekolip.ru/folder1/> (Accessed 26.07.2021). (In Russ.).
7. Glushakova O.V., Chernikova O.P. Influence of ferrous metallurgy enterprises on atmospheric air quality as an ecological component of territories sustainable development. Report 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 292–301. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-292-301>
8. Finch N. The Motivations for Adopting Sustainability Disclosure (August 2005). *MGSM Working Paper No. 2005-17*. Available at URL: <https://ssrn.com/abstract=798724> (Accessed 26.07.2021).
9. Nazim H. Impact of Sustainability Performance on Financial Performance: An Empirical Study of Global Fortune (N100) Firms (June 10, 2015). *Department of Management, Università Ca' Foscari Venezia Working Paper No. 2015/01*. Available at URL: <https://ssrn.com/abstract=2616835> (Accessed 26.07.2021).
10. Erina M.T., Rashid A. *Relationship between Corporate Sustainability Practices and Financial Performance: Evidence from the GRI Reporting Companies (September 25, 2012)*. Available at URL: <https://ssrn.com/abstract=2152124> (Accessed 26.07.2021).
11. Oba V., Ibikunle J. *Issues in Sustainability Accounting: A Global Reporting Initiative Perspective (January 2, 2015)*. Available at URL: <https://ssrn.com/abstract=2544555> (Accessed 26.07.2021).
12. Gallego-Álvarez I., Lozano M.B., Rodríguez-Rosa M. An analysis of the environmental information in international companies according to the new GRI standards. *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 182, pp. 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.240>
13. Chen L., Tang O., Feldmann A. Applying GRI reports for the investigation of environmental management practices and company performance in Sweden, China and India. *Journal of Cleaner Production*. 2015, vol. 98, pp. 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.001>
14. Chen L., Feldmann A., Tang O. The relationship between disclosures of corporate social performance and financial performance:

- Evidences from GRI reports in manufacturing industry // *International Journal of Production Economics*. 2015. Vol. 170. P. 445–456. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.04.004>
15. Boiral O., Heras-Saizarbitoria I. Best practices for corporate commitment to biodiversity: An organizing framework from GRI reports // *Environmental Science & Policy*. 2017. Vol. 77. P. 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.07.012>
  16. García-Sánchez I.M., Gómez-Miranda M.E., David F., Rodríguez-Ariza L. Board independence and GRI-IFC performance standards: The mediating effect of the CSR committee // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 225. P. 554–562. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.337>
  17. Fuente J.A., García-Sánchez I.M., Lozano M.B. The role of the board of directors in the adoption of GRI guidelines for the disclosure of CSR information // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 141. P. 737–750. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.337>
  18. Tsalis T.A., Nikolaou I.E., Evangelinos K.I. Evaluating the corporate environmental profile by analyzing corporate social responsibility reports // *Economic Analysis and Policy*. 2020. Vol. 66. P. 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2020.02.009>
  19. Haffar M., Searcy C. The use of context-based environmental indicators in corporate reporting // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 192. P. 496–513. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.202>
  20. Kaya I. The Mandatory Social and Environmental Reporting: Evidence from France // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2016. Vol. 229. P. 206–213. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.07.130>
  21. Mealy P., Teytelboym A. Economic complexity and the green economy // *Research Policy*. 2020. Article 103948. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2020.103948>
  22. Hess D. Social reporting and new governance regulation: the prospects of achieving corporate accountability through transparency // *Business Ethics Quarterly*. 2007. Vol. 17. No. 3. P. 453–476. <https://doi.org/10.5840/beq200717348>
  23. Кузубов С.А., Евдокимова М.С. Повышает ли стоимость компании публикация нефинансовых отчетов по стандартам GRI? (на примере стран БРИКС) // *Учет. Анализ. Аудит*. 2017. № 2. С. 28–36.
  24. Голубева Н.А. Внутренний аудит: поддержка решения задачи соответствия стандартам GRI и ISO 26000 по определению стейкхолдеров компаний и оценке их притязаний // *Международный бухгалтерский учет*. 2011. № 17 (167). С. 23–30.
  25. Евдокимов В.В., Грищенко О.О. Принципы GRI в системе отчетности устойчивого развития // *Международный бухгалтерский учет*. 2013. № 22 (268). С. 44–53.
  26. Боброва О.С., Малайкина И.В. Устойчивое развитие: как его понимают энергетические компании в России // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: экономика и менеджмент*. 2018. Т. 12. № 1. С. 63–79.
  27. Рыкова И.Н., Голубева Н.А. Исследование эволюции корпоративной социальной отчетности российских предприятий // *Международный бухгалтерский учет*. 2010. № 9 (141). С. 2–11.
  28. Евдокимов В.В., Лаговская Е.А., Грицишен Д.А. Международные модели регулирования отчетности об устойчивом развитии предприятия // *Международный бухгалтерский учет*. 2012. № 16 (214). С. 44–52.
  29. Лазаренко А.Л., Думанова Н.А., Подрезенко Е.В. Корпоративная отчетность как инструмент повышения эффективности деятельности компании // *Вестник ОрелГИЭТ*. 2016. № 1 (35). С. 11–14.
- Evidences from GRI reports in manufacturing industry. *International Journal of Production Economics*. 2015, vol. 170, pp. 445–456. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.04.004>
  15. Boiral O., Heras-Saizarbitoria I. Best practices for corporate commitment to biodiversity: An organizing framework from GRI reports. *Environmental Science & Policy*. 2017, vol. 77, pp. 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.07.012>
  16. García-Sánchez I.M., Gómez-Miranda M.E., David F., Rodríguez-Ariza L. Board independence and GRI-IFC performance standards: The mediating effect of the CSR committee. *Journal of Cleaner Production*. 2019, vol. 225, pp. 554–562. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.337>
  17. Fuente J.A., García-Sánchez I.M., Lozano M.B. The role of the board of directors in the adoption of GRI guidelines for the disclosure of CSR information. *Journal of Cleaner Production*. 2017, vol. 141, pp. 737–750. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.337>
  18. Tsalis T.A., Nikolaou I.E., Evangelinos K.I. Evaluating the corporate environmental profile by analyzing corporate social responsibility reports. *Economic Analysis and Policy*. 2020, vol. 66, pp. 63–75. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2020.02.009>
  19. Haffar M., Searcy C. The use of context-based environmental indicators in corporate reporting. *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 192, pp. 496–513. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.202>
  20. Kaya I. The Mandatory Social and Environmental Reporting: Evidence from France. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2016, vol. 229, pp. 206–213. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.07.130>
  21. Mealy P., Teytelboym A. Economic complexity and the green economy. *Research Policy*. 2020, article 103948. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2020.103948>
  22. Hess D. Social reporting and new governance regulation: the prospects of achieving corporate accountability through transparency. *Business Ethics Quarterly*. 2007, vol. 17, no. 3, pp. 453–476. <https://doi.org/10.5840/beq200717348>
  23. Kuzubov S.A., Evdokimova M.S. Does the publication of GRI non-financial reports add value to the company? (On the example of the BRICS countries). *Uchet. Analiz. Audit*. 2017, no. 2, pp. 28–36. (In Russ.).
  24. Golubeva N.A. Internal audit: Support in solving the problem of compliance with GRI and ISO 26000 standards to identify company stakeholders and assess their claims. *Mezhdunarodnyi bukhgalterskii uchet*. 2011, no. 17 (167), pp. 23–30. (In Russ.).
  25. Evdokimov V.V., Grishchenko O.O. GRI principles in reporting system of sustainable development. *Mezhdunarodnyi bukhgalterskii uchet*. 2013, no. 22 (268), pp. 44–53. (In Russ.).
  26. Bobrova O.S., Malaikina I.V. Sustainable development: How do energy companies in Russia understand it. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: ekonomika i menedzhment*. 2018, vol. 12, no. 1, pp. 63–79. (In Russ.).
  27. Rykova I.N., Golubeva N.A. Evolution of corporate social reporting of Russian enterprises. *Mezhdunarodnyi bukhgalterskii uchet*. 2010, no. 9 (141), pp. 2–11. (In Russ.).
  28. Evdokimov V.V., Lagovskaya E.A., Gritishen D.A. International models of regulation of enterprise reporting on sustainable development. *Mezhdunarodnyi bukhgalterskii uchet*. 2012, no. 16 (214), pp. 44–52. (In Russ.).
  29. Lazarenko A.L., Dumanova N.A., Podrezenko E.V. Corporate reporting as a tool to improve the company efficiency. *Vestnik Orel'GIET*. 2016, no. 1 (35), pp. 11–14. (In Russ.).

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Ольга Владимировна Глушакова**, д.э.н., профессор кафедры экономики, учета и финансовых рынков, Сибирский государственный индустриальный университет

**ORCID:** 0000-0002-5410-6623

**E-mail:** trinity@ktk.company

**Оксана Петровна Черникова**, к.э.н., доцент, заведующий кафедрой экономики, учета и финансовых рынков, Сибирский государственный индустриальный университет

**ORCID:** 0000-0002-9268-415x

**E-mail:** chernikovaop@yandex.ru

**Ol'ga V. Glushakova**, Dr. Sci. (Economics), Prof. of the Chair of Economics, Accounting and Financial Markets, Siberian State Industrial University

**ORCID:** 0000-0002-5410-6623

**E-mail:** trinity@ktk.company

**Oksana P. Chernikova**, Cand. Sci. (Economics), Assist. Prof., Head of the Chair of Economics, Accounting and Financial Markets, Siberian State Industrial University

**ORCID:** 0000-0002-9268-415x

**E-mail:** chernikovaop@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.10.2020

После доработки 14.12.2020

Принята к публикации 15.12.2020

Received 12.10.2020

Revised 14.12.2020

Accepted 15.12.2020



Оригинальная статья

УДК 621.791.05:620.179

DOI 10.17073/0368-0797-2021-8-572-580



## ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ НА ПАРАМЕТРЫ СУБСТРУКТУРЫ И ПОЛЯ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНЕ ЛИНИИ СПЛАВЛЕНИЯ

А. Н. Смирнов<sup>1</sup>, Н. А. Попова<sup>2</sup>, Н. В. Абабков<sup>1</sup>,  
К. В. Князьков<sup>1</sup>, Е. Л. Никоненко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева (Россия, 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28)

<sup>2</sup> Томский государственный архитектурно-строительный университет (Россия, 634003, Томск, пл. Соляная, 2)

**Аннотация.** В настоящее время на технических устройствах опасных производственных объектов первичную оценку качества сварки выполняют испытанием оборудования повышенными нагрузками (повышенным давлением). Требования к испытаниям регламентированы нормативными документами Ростехнадзора. В последнее время, наряду с традиционными испытаниями, применяют «стресс-тест», сущность которого заключается в нагружении участка трубопровода до предела текучести с последующей проверкой на герметичность. Но в научных публикациях практически отсутствует информация о физических процессах, протекающих в основном металле и в металле сварных соединений при выполнении таких испытаний. Также не оценено влияние предварительной нагрузки (деформации) на параметры субструктуры и поля внутренних напряжений в сварных соединениях аустенитных сталей. Как следствие, не оценено влияние предварительной нагрузки (деформации) на дальнейшую безаварийную эксплуатацию испытанного оборудования. В работе проведен анализ изменения структурного состояния и значений амплитуд внутренних напряжений в образцах из стали 12Х18Н10Т под действием нагрузок. Обосновывается применение сварки модулированным током с автоматическим регулированием процесса тепловложения в сварочную ванну. Аргументируются предельно допустимые значения пластической деформации при испытаниях технических устройств повышенным давлением для данного типа стали. Показано, что для снижения риска повреждений сварных соединений аустенитных сталей (12Х18Н10Т) технических устройств опасных производственных объектов, выполненных импульсной сваркой с мелкокапельным переносом, для исключения образования в них микродефектов испытания повышенным давлением (стресс-тест) можно проводить при нагрузках, создающих в металле деформации, не превышающие 5 %; для соединений, заваренных ручной дуговой сваркой, деформации должны быть менее 5 %. Сварные соединения, выполненные импульсной сваркой с крупнокапельным переносом (с дефектами и без), не рекомендуется испытывать повышенным давлением.

**Ключевые слова:** пластическая деформация, поля внутренних напряжений, ручная дуговая сварка, сварка модулированным током, экзистенциальные контуры, плотность дислокаций, аустенитные стали, субструктура

**Финансирование:** Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Президента РФ для поддержки молодых кандидатов наук, МК-1084.2020.8.

**Благодарности:** Авторы признательны сотрудникам кафедры физики ТГАСУ Н.А. Коневой, М.В. Федорищевой, Н.Р. Сизоненко и М.П. Калашникову за участие в проведении исследований, а также Е.А. Ожиганову, В.Л. Князькову (КузГТУ) и А.Ф. Князькову (ТПУ) за участие в постановочных экспериментах.

**Для цитирования:** Смирнов А.Н., Попова Н.А., Абабков Н.В., Князьков К.В., Никоненко Е.Л. Влияние степени деформации сварных соединений аустенитных сталей на параметры субструктуры и поля внутренних напряжений в зоне линии сплавления // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 8. С. 572–580. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-572-580>

Original article

## INFLUENCE OF DEFORMATION DEGREE OF AUSTENITIC STEELS WELDED JOINTS ON STRUCTURAL STATE AND INTERNAL STRESSES FIELDS IN WELD LINE ZONE

A. N. Smirnov<sup>1</sup>, N. A. Popova<sup>2</sup>, N. V. Ababkov<sup>1</sup>,  
K. V. Knyaz'kov<sup>1</sup>, E. L. Nikonenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (28 Vesennaya Str., Kemerovo 650000, Russian Federation)

<sup>2</sup> Tomsk State University of Architecture and Building (2 Solyanaya Sqr., Tomsk 634003, Russian Federation)

**Abstract.** Nowadays initial assessment of welding quality is performed by testing equipment with increased loads (high pressure) at technical devices of hazardous production facilities. Test requirements are regulated by standardized documents of the Federal Service for Environmental, Technological

and Nuclear Oversight of Russia (Rostekhnadzor). Recently, along with traditional tests, a “stress test” was used – the essence of which is to load pipeline section to the yield point, followed by leak test. However, in scientific publications there is practically no information about physical processes occurring in the base metal and in welded joints during such tests. In addition, effect of preload (deformation) on the parameters of substructure and internal stresses field in welded joints of austenitic steels and, consequently, on the further trouble-free operation of the tested equipment was not evaluated. The paper analyzes changes in structural state and values of internal stresses in the samples of austenitic steel under the action of high loads. It substantiates the use of modulated current welding with automatic control of heat input process in molten weld pool. The admissible limits values of plastic deformation are argued when testing technical devices with high pressure for this type of steel. In order to reduce the risk of damage to austenitic steels welded joints of technical devices of hazardous industrial facilities, performed by pulsed welding with small-drop transfer, and to exclude formation of microdefects in them, high pressure tests (stress test) can be performed under loads that create deformations in metal, not exceeding 5 %. For joints welded by manual arc welding, deformations should be less than 5 %. Welded joints made by pulsed welding with large-drop transfer (with and without defects) are not recommended to be tested with high pressure.

**Keywords:** plastic deformation, internal stress fields, manual arc welding, modulated current welding, existential contours, dislocation density, austenitic steel, substructure

**Funding:** The research was supported by the grant of the President of the Russian Federation to support young candidates of science, MK-1084.2020.8.

**Acknowledgements:** The authors are grateful to the staff of the Chair of Physics of TSASU: N.A. Koneva, M.V. Fedorischeva, N.R. Sizonenko and M.P. Kalashnikov for their participation in the research, as well as to E.A. Ozhiganov, V.L. Knyazkov (KuzGTU) and A.F. Knyazkov (TPU) for their participation in the experiments.

**For citation:** Smirnov A.N., Popova N.A., Ababkov N.V., Knyaz'kov K.V., Nikonenko E.L. Influence of deformation degree of austenitic steels welded joints on structural state and internal stresses fields in weld line zone. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 8, pp. 572–580. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-572-580>

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на опасных производственных объектах первичную оценку качества сварки выполняют испытанием оборудования повышенными нагрузками (повышенным давлением). Требования к испытаниям регламентированы нормативными документами Ростехнадзора. Наряду с традиционными испытаниями в последнее время применяют «стресс-тест». Сущность этого метода заключается в нагружении участка трубопровода до предела текучести с последующей проверкой на герметичность [1, 2]. Однако в научных публикациях практически отсутствует информация о физических процессах, протекающих в основном металле и в металле сварных соединений при выполнении таких испытаний. Не оценено влияние предварительной нагрузки (деформации) на параметры субструктуры и поля внутренних напряжений в сварных соединениях аустенитных сталей и, как следствие, не оценено влияние такой нагрузки на дальнейшую безаварийную эксплуатацию испытанного оборудования.

В связи с вышеизложенным цель настоящей работы заключается в металлофизическом обосновании предельных степеней деформации (нагрузок), которым можно подвергать сварные соединения из аустенитной стали (12X18Н10Т), выполненные ручной дуговой сваркой (РДС) и сваркой модулированным током при различных режимах тепловложения без образования микродефектов при их стресс-испытаниях [3, 4].

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовали сварные соединения из стали 12X18Н10Т (ГОСТ 5949 – 2018) непосредственно после сварки и после деформирования до 5 и 12 %, которые были выполнены ручной дуговой сваркой (РДС),

импульсной сваркой [1, 3] с мелкокапельным переносом (МК), крупнокапельным переносом с искусственными дефектами (ККд) и без дефектов (КК).

Сварку выполняли при рекомендуемом заводом изготовителем электродов режиме (сила тока ( $I$ ) 40 – 80 А). Отмечено, что при  $I = 70$  А наблюдается переход с крупнокапельного на мелкокапельный перенос, однако короткие замыкания присутствуют и составляют 25 – 35 мс. При режимах сварки свыше 80 А происходило увеличение объема сварочной ванны, что снижало сварочно-технологические свойства при сварке в положениях, отличных от нижнего положения. Для улучшения стационарного процесса сварки применен модулятор УДИ-203, который обеспечивает изменение процесса формирования перехода капли за счет управления величиной сварочного тока в короткие периоды времени (рис. 1, а). Параметры представленного режима сварки:  $I_{\text{и}} = 135$  А;  $I_{\text{п}} = 40$  А;  $t_{\text{и}} = 500$  мс;  $t_{\text{п}} = 100$  мс (где  $I$  и  $t$  – сила тока и период; индексы «и» и «п» – импульс и пауза). Величина тока импульса  $I_{\text{и}}$  подобрана таким образом (рис. 1, б), что в период его действия отсутствуют короткие замыкания дугового промежутка каплями электродного металла. Период импульса  $t_{\text{и}}$  в данном процессе определяет размер сварочной ванны и выбран в зависимости от пространственного положения шва, теплофизических свойств электродного и основного металлов:  $t_{\text{и}} = 250$  мс. Установлено, что при  $I_{\text{и}} = 129$  А,  $I_{\text{п}} = 30$  А,  $t_{\text{и}} = 250$  мс,  $t_{\text{п}} = 200$  мс время коротких замыканий меньше 5 мс, характер переноса металла мелкокапельный. Процесс сварки стабилен и средний ток  $I_{\text{ср}}$  составляет 78 А.

Методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) анализировали структуру металла сварных соединений после сварки всеми способами и после деформации до 5 и 12 % в зоне линии сплавления на расстоянии 0,5 мм от нее в металле шва и 1,0 мм в зоне

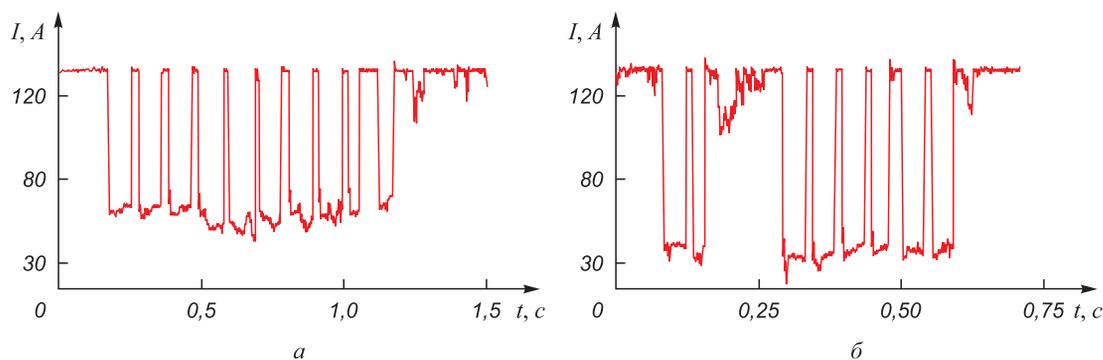


Рис. 1. Осциллограмма сварки модулированным током с крупнокапельным (а) и с мелкокапельным (б) переносом

Fig. 1. Oscillogram of modulated current welding with large-drop (a) and small-drop (b) transfer

теплого воздействия (ЗТВ). Выбор этих участков для исследования обусловлен тем, что именно здесь существует наибольшая вероятность трещинообразования как после сварки, так и в процессе длительной эксплуатации [5, 6]. Образцы изготавливали из сваренных пластин размером  $250 \times 125 \times 6$  мм с расположением шва в середине образца. Химический состав пластин: 0,12 % С; 18,1 % Cr; 9,6 % Ni; 0,8 % Si; 0,7 % Ti; 2,0 % Mn; 0,02 % S; 0,025 % P. Механические свойства пластин определяли по ГОСТ 1497 – 84. Временное сопротивление – 575 МПа, физический предел текучести – 280 МПа. Временное сопротивление сварных соединений определяли по ГОСТ 6996 – 66 на плоских образцах. После сварки стационарной дугой (РДС) временное сопротивление составляло 610 МПа, после импульсной сварки с крупнокапельным переносом (КК) – 540 МПа, с мелкокапельным переносом (МК) – 635 МПа, с крупнокапельным переносом и наличием искусственных дефектов (ККд) – 375 МПа. Искусственные дефекты создавали введением в сварочную ванну алюминиевого порошка. Механические испытания и предварительную деформацию образцов проводили на машине Walter + Bai AG LFM-125 (Швейцария) со средней скоростью нагружения 18 Н/с. При исследовании определяли два вида внутренних напряжений: напряжения сдвига (поля напряжений, создаваемые дислокационной структурой); дальнедействующие напряжения – моментные (или локальные) напряжения, возникающие в тех местах материала, в которых присутствует избыточная плотность (или дислокационный заряд) дислокаций ( $\rho_{\pm}$ ). Внутренние напряжения идентифицировали по наличию в материале изгибных экстинкционных контуров [7 – 9].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В исходном состоянии матрица стали 12X18H10T представляет собой  $\gamma$ -фазу (аустенит) [10 – 15]. Выявлены зерна, в которых наряду с дислокационной субструктурой присутствуют механические (или деформационные) микродвойники в виде пакетов одной, двух

и трех систем. Микроструктура основного металла (перед сваркой) полностью сдвойникованная [16 – 20]. Амплитуда внутренних напряжений сдвига 280 МПа, а моментных 285 МПа соответственно. В стали 12X18H10T величина средней скалярной плотности дислокаций составляет  $2,0 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ . Средняя избыточная плотность дислокаций, измеренная из ширины изгибных экстинкционных контуров, составляет  $1,97 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  (то есть практически равна  $\rho$ ).

### Структура металла в зоне линии сплавления после сварки

В сварных соединениях стали 12X18H10T, сваренных по четырем режимам, произошли однотипные превращения  $\gamma \rightarrow \varepsilon$ ,  $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha$ ,  $\gamma \rightarrow \alpha$  как в металле шва, так и ЗТВ, причем в металле швов превращения происходят более интенсивно. В ЗТВ после РДС, КК, МК получены  $\gamma$ -зерна с сетчатой дислокационной субструктурой (ДСС), где их содержание не превышает 10 %. В наплавленном металле эта фаза везде в исследованном металле превратилась в зерна с микродвойниками и  $\varepsilon$ -мартенситом. Зерна  $\alpha$ -фазы обнаружены в ЗТВ после импульсной сварки с ККд (10 %). После импульсной сварки с крупнокапельным переносом с дефектами (ККд) и без дефектов (КК) в металле швов обнаружены высокие моментные напряжения ( $\sigma_{\text{д}}$ ), средняя амплитуда которых при ККд составляет 910 МПа, из них упругая составляющая достигает 595 МПа. После ККд эти напряжения создали условия для зарождения микроразрывов. Минимальный уровень внутренних напряжений в металле шва наблюдается после импульсной сварки модулированным током с мелкокапельным переносом:  $\sigma_{\text{д}} = 305 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{\text{д}} = 270 \text{ МПа}$ .

### Структура металла в зоне термического влияния сварки после пластической деформации

При деформации сварных соединений до 5 % после РДС средняя скалярная плотность дислокаций увеличилась до  $\rho = 3,56 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , при этом  $\rho_{\pm} = 2,06 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ,

$\sigma_{\perp} = 375$  МПа,  $\sigma_{\parallel} = 285$  МПа. После импульсной сварки с крупнокапельным переносом (КК) структура представлена зернами  $\gamma$ -фазы с плотными дислокационными сетками (рис. 2). Зерна  $\gamma$ -фазы с механическими (или деформационными) микродвойниками занимают 85 % объема. Максимальная амплитуда внутренних напряжений выявлена в зернах с сетчатой субструктурой:  $\sigma_{\perp} = 440$  МПа,  $\sigma_{\parallel} = 370$  МПа. Изгиб-кручение кристаллической решетки во всех зернах  $\gamma$ -фазы имеет пластический характер. После ККд деформация 5 % привела к  $\gamma \rightarrow \epsilon$ -превращению. В зернах  $\alpha$ -фазы изгиб-кручение кристаллической решетки имеет упругий характер. Металл достиг предельного состояния. Увеличение степени пластической деформации до  $\epsilon = 6$  % привело к дальнейшему изменению структурно-фазового состояния основного металла и его разрушению:  $\sigma_{\perp} = 265$  МПа,  $\sigma_{\parallel} = \sigma_{\perp}^{пл} + \sigma_{\parallel}^{упр} = 265 + 1770 = 2035$  МПа, то есть  $\sigma_{\perp}$  меньше  $\sigma_{\parallel}$  более, чем в семь раз. После МК амплитуда внутренних напряжений наибольшая в зернах без двойников и  $\epsilon$ -мартенсита:  $\sigma_{\perp} = 405$  МПа,  $\sigma_{\parallel} = 290$  МПа (рис. 3, а). Во всех зернах изгиб-кручение кристаллической решетки носит пластический характер.

После деформации до 12 % во всех сварных соединениях произошло  $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение. После РДС средняя амплитуда внутренних локальных напряжений  $\sigma_{\perp}$  в зернах  $\alpha$ -мартенсита составила 535 МПа, причем пластическая и упругая составляющая  $\sigma_{\perp}$  составляют 295 и 240 МПа соответственно, при этом  $\sigma_{\parallel} = 295$  МПа. Кривизна-кручение кристаллической решетки здесь носит упруго-пластический характер,  $\sigma_{\perp}^{пл} \approx \sigma_{\parallel}^{упр}$ .

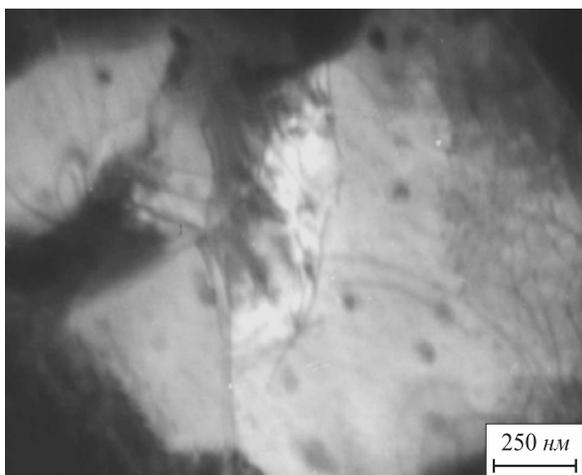


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение участка аустенитных зерен основного металла после сварки импульсным методом (крупнокапельный перенос) в зоне термического влияния,  $\epsilon = 5$  % (дефектная структура зерен – дислокационные сетки)

Fig. 2. Electron micrographs of austenitic grains sections of the base metal after welding by pulsed method (large-drop transfer) in the zone of thermal influence,  $\epsilon = 5$  % (defective grain structure – dislocation grids)

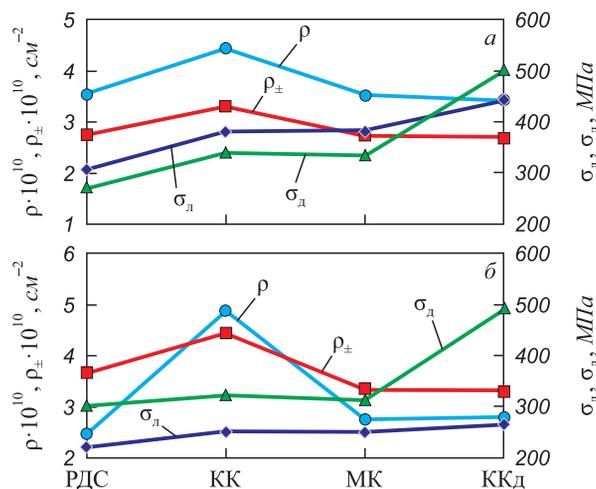


Рис. 3. Амплитуда полей внутренних напряжений ( $\sigma_{\perp}$  и  $\sigma_{\parallel}$ ) и плотности дислокаций ( $\rho$  и  $\rho_{\perp}$ ) при деформации 5 %: а – в зоне термического влияния; б – в металле шва

Fig. 3. Amplitude of internal stresses fields ( $\sigma_{\perp}$  and  $\sigma_{\parallel}$ ) and dislocations density ( $\rho$  and  $\rho_{\perp}$ ) at deformation of 5 %: а – in zone of thermal influence; б – in weld metal

При КК кривизна-кручение кристаллической решетки также имеет упруго-пластический характер и металл склонен к трещинообразованию.

После МК пластическая деформация до 12 % привела к тому, что в ЗТВ появились зерна  $\gamma$ -фазы, внутри которых присутствуют пакеты пластин  $\epsilon$ -мартенсита (рис. 4), объемная доля которых 10 %. Среднее значение скалярной плотности дислокаций  $3,09 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  (рис. 5, а) Необходимо отметить, что в зернах  $\gamma$ -фазы с пластинами  $\epsilon$ -мартенсита изгибные экстинкционные контуры не обнаружены и, следовательно, уровень внутренних напряжений минимален.

### Структура металла шва после сварки и пластической деформации

В металле швов после всех видов сварки и деформации до 5 % происходит интенсификация  $\gamma \rightarrow \epsilon$  фазового превращения. Дислокационная структура во всех зернах имеет вид плотных дислокационных сеток. Присутствуют зерна  $\gamma$ -фазы, содержащие пакеты пластин  $\epsilon$ -мартенсита, и зерна, одновременно содержащие, как правило, пересекающиеся пакеты микродвойников и  $\epsilon$ -мартенсита. После сварки с КК и деформации 5 % амплитуда внутренних напряжений  $\sigma_{\perp}$  в зернах с микродвойниками составляет 460 МПа,  $\sigma_{\parallel} = 330$  МПа (рис. 3, б). Во всех зернах изгиб-кручение кристаллической решетки  $\gamma$ -фазы носит пластический характер. Введение в сварочную ванну искусственных дефектов при крупнокапельном переносе (ККд) изменило микроструктуру шва. В структуре сварного шва выявлены отдельные включения (рис. 6). Изгиб-кручение в таких участках материала имеет упругий характер. Амплитуда внутренних напряжений во фрагментированных

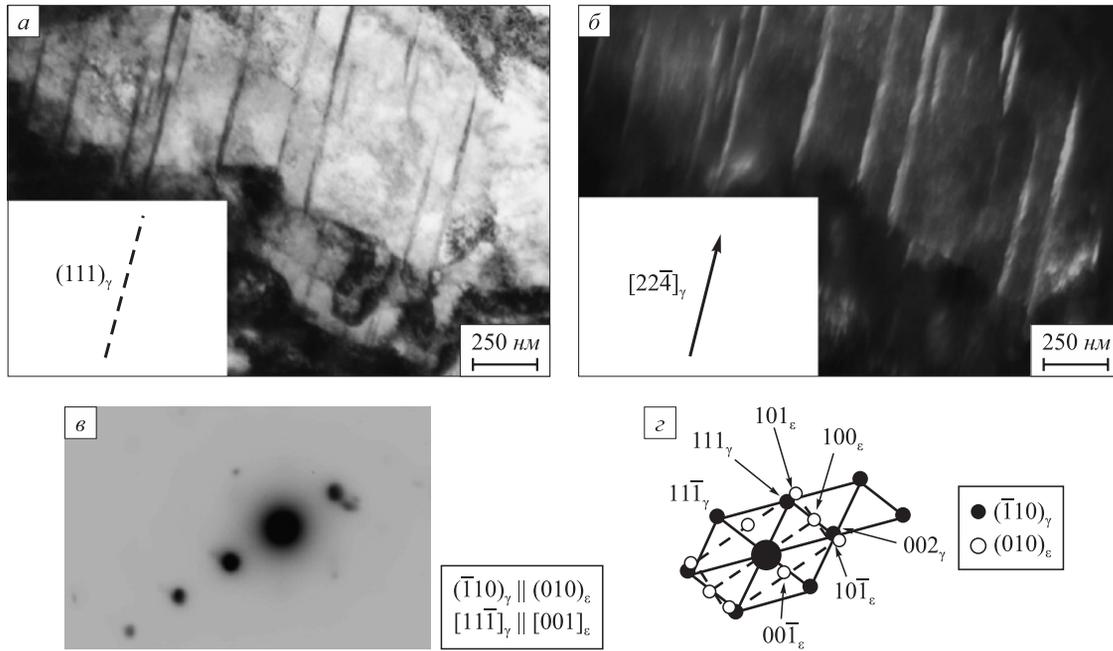


Рис. 4. Электронно-микроскопическое изображение аустенитного зерна, содержащего пакет пластин ε-мартенсита (основной металл после сварки импульсным методом (мелкокапельный перенос), зона термического влияния, ε = 12 %): а – светлопольное изображение; б – темнопольное изображение, полученное в рефлексе ε-фазы [100]ε; в и г – микродифракционная картина и ее индцированная схема

Fig. 4. Electron micrographs of austenitic grain containing a packet of ε-martensite plates (base metal after welding by pulsed method (small-drop transfer); zone of thermal influence, ε = 12 %): а – bright field image; б – dark-field image obtained in reflection of ε phase [100]ε; в and г – microdiffraction picture and its indicated pattern

зернах ( $\sigma_d$ ) достигает 905 МПа. При дальнейшей деформации (до 5 %) амплитуда моментных внутренних напряжений возросла в металле шва до 1080 МПа, однако эти напряжения создаются в 15 % объема материала, где

изгиб-кручение кристаллической решетки γ-фазы носит упруго-пластический характер, а в 85 % – пластический. Поэтому образования микротрещин, способных привести к разрушению, в металле шва не произошло (металл разрушился по ЗТВ). После деформации сварных соединений, выполненных импульсным методом с мелкокапельным переносом (МК) (до 5 %), микроструктура металла шва представляет собой зерна γ-фазы с деформационными микродвойниками (рис. 7). Деформация привела к фазовому γ → ε-превращению в 85 % объема металла шва. Амплитуда внутренних напряжений максимальна в зернах с частицами ε-мартенсита, расположенными в стыках и границах дислокационных фрагментов ( $\sigma_l = 390$  МПа,  $\sigma_d = 355$  МПа). Во всех зернах γ-фазы изгиб-кручение кристаллической решетки носит пластический характер.

Увеличение степени пластической деформации до 12 % привело к образованию α-фазы (до 20 %) в сварных соединениях после РДС (рис. 8, а, б), границы зерен которой являются мощными источниками полей внутренних напряжений. При КК с увеличением деформации до 12 % возросла как скалярная, так и избыточная плотность дислокаций (до  $6,18 \cdot 10^{10}$  и  $3,40 \cdot 10^{10}$  см<sup>-2</sup> соответственно). Изгиб кристаллической решетки имеет упруго-пластический характер. После МК деформация привела к полному фазовому γ → ε и к пластическому характеру изгиба-кручения кристаллической решетки во всех зернах γ-фазы. Амплитуда внутренних

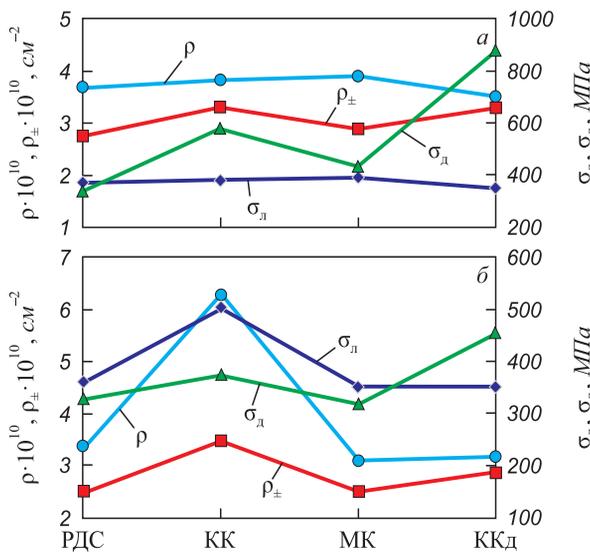


Рис. 5. Амплитуды полей внутренних напряжений ( $\sigma_l$  и  $\sigma_d$ ) и плотности дислокаций ( $\rho$  и  $\rho_{\pm}$ ) при деформации 12 %: а – в зоне термического влияния; б – в металле шва

Fig. 5. Amplitudes of internal stresses fields ( $\sigma_l$  and  $\sigma_d$ ) and dislocations density ( $\rho$  and  $\rho_{\pm}$ ) at deformation of 12 %: а – in zone of thermal influence; б – in weld metal

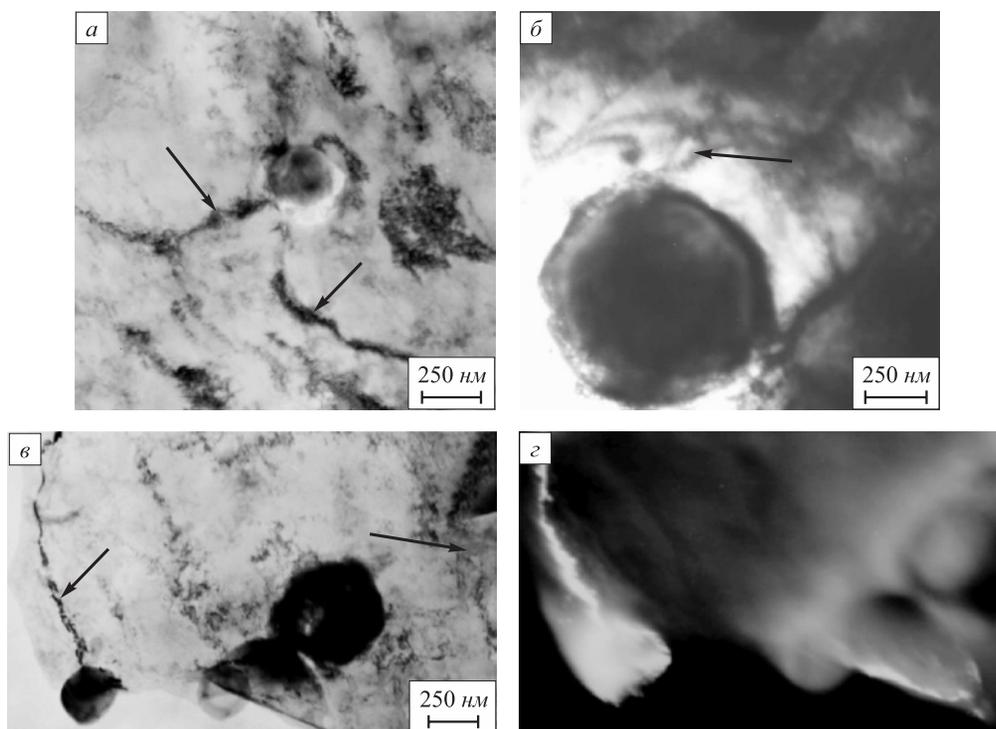


Рис. 6. Электронно-микроскопическое изображение тонкой структуры металла шва после сварки импульсным методом (крупнокапельный перенос) с введением искусственных дефектов,  $\epsilon = 5\%$ :  
 а – в – светлопольные изображения; г – темнопольное изображение

Fig. 6. Electron micrograph of weld metal fine structure after pulse welding (large-drop transfer) with introduction of artificial defects,  $\epsilon = 5\%$ :  
 а – в – bright-field images; г – dark-field image

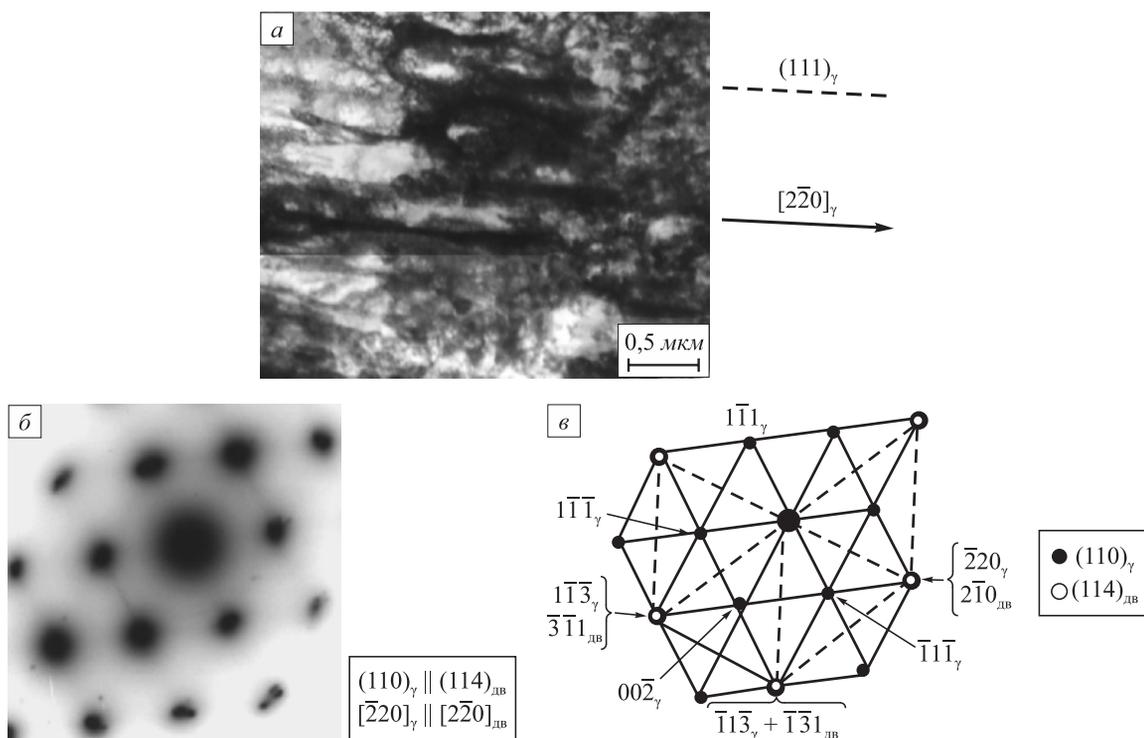


Рис. 7. Электронно-микроскопическое изображение аустенитного зерна шва, содержащего пакет микродвойников при сварке импульсным методом (мелкокапельный перенос),  $\epsilon = 5\%$ :  
 а – светлопольное изображение; б и в – микродифракционная картина и ее индцированная схема

Fig. 7. Electron micrograph of weld austenitic grain containing a package of microdoublers at pulse welding (small-drop transfer),  $\epsilon = 5\%$ :  
 а – bright-field image; б and в – microdiffraction picture and its indicated circuit

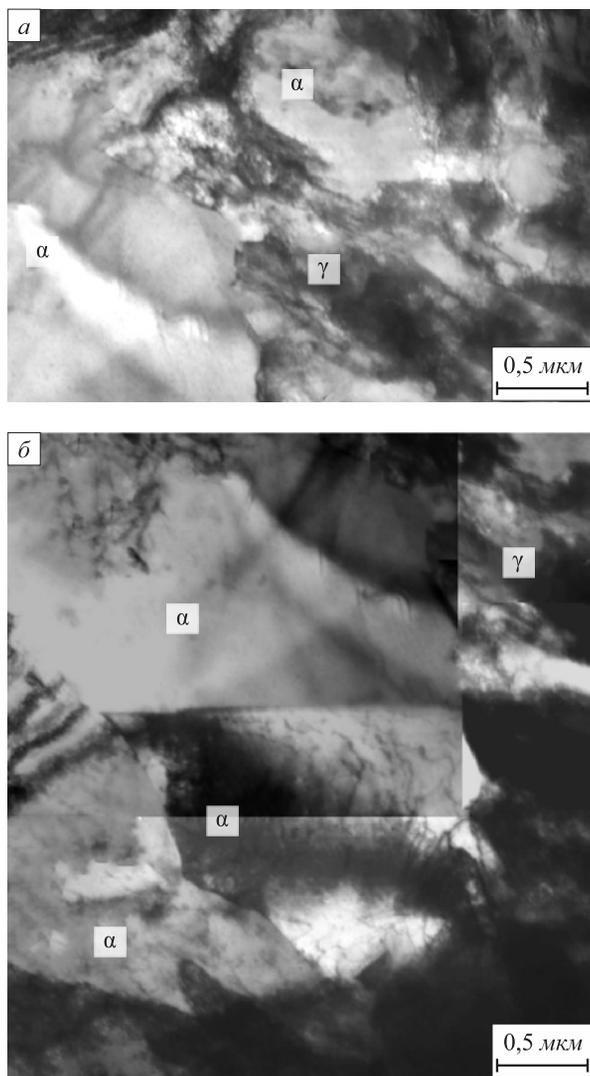


Рис. 8. Электронно-микроскопические изображения структуры материала сварного шва после РДС, деформированного до  $\varepsilon = 12\%$  ( $\alpha$ -зерна  $\alpha$ -мартенсита,  $\gamma$ -зерна аустенита)

Fig. 8. Electron micrographs of the weld material structure after manual arc welding, deformed to  $\varepsilon = 12\%$  ( $\alpha$ -grains of  $\alpha$ -martensite,  $\gamma$ -grains of austenite)

напряжений максимальна в  $\gamma$ -зернах с микродвойниками ( $\sigma_{\perp} = 385$  МПа,  $\sigma_{\parallel} = 375$  МПа) (рис. 5, б).

Таким образом, в работе установлено, что деформация сварных соединений в интервале до 5 % во всех ис-

следованных образцах приводит к ускорению фазового  $\gamma \rightarrow \varepsilon$ -превращения, причем в металле швов это превращение происходит более интенсивно. Дальнейшее повышение степени пластической деформации (до 12 %) приводит к фазовому  $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha$ -превращению. Показано, что в структуре металла в зоне линий сплавления образцов из стали 12X18H10T после сварки всеми способами и деформирования до 12 % изгиб-кручение кристаллической решетки может иметь пластический, упруго-пластический или упругий характер [8]. При пластическом изгибе металл не склонен к трещинообразованию [8]. При  $\rho < \rho_{\pm}$  и  $\sigma_{\perp} < \sigma_{\parallel}$  изгиб-кручение кристаллической решетки носит упруго-пластический характер. При таких условиях может произойти возникновение микротрещин.

Установлено, что сварка с МК и деформация до 12 % создали структуры, где уровень внутренних напряжений минимален, изгиб решетки упруго-пластический только в зоне основного металла, упругая составляющая здесь незначительна. После сварки с КК с искусственными дефектами и без них, а также деформации от 5 до 12 % изгиб-кручение кристаллической решетки изменяется от упруго-пластического (КК) до упругого (ККд), где моментные напряжения становятся практически в семь раз больше напряжений сдвига. Деформирование образцов после РДС более 5 % привело к образованию в структуре  $\alpha$ -фазы (до 20 %) и упруго-пластическому изгибу кристаллической решетки.

## Выводы

Для снижения риска повреждений сварных соединений аустенитных сталей (12X18H10T) технических устройств опасных производственных объектов, выполненных импульсной сваркой с мелкокапельным переносом, для исключения образования в них микродефектов испытания повышенным давлением (стресс-тест) можно проводить при нагрузках, создающих в металле деформации, не превышающие 5 %, для соединений, заваренных ручной дуговой сваркой, деформации должны быть менее 5 %. Сварные соединения, выполненные импульсной сваркой с крупнокапельным переносом (с дефектами и без), не рекомендуется испытывать повышенным давлением.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Алешин Н.П., Гладков Э.А., Кузнецов П.С., Бродягин В.Н., Копотева Е.Н., Шолохов М.А. Импульсные технологии управления каплепереносом при MIG/MAG сварке // Сварка и диагностика. 2014. № 3. С. 43–47.
2. Смирнов А., Ожиганов Е., Бакланов Д., Субботин А., Ощепков Н. Испытания оборудования, работающего под давлением на опасных производственных объектах // ТехНадзор. 2015. № 10 (107). С. 72–75.
3. Князьков В.Л., Князьков А.Ф. Повышение эффективности ручной дуговой сварки трубопроводов. Кемерово: КузГТУ, 2008. 104 с.

1. Aleshin N.P., Gladkov E.A., Kuznetsov P.S., Brodyagin V.N., Kopoteva E.N., Sholokhov M.A. Pulse technologies for droplet transfer control in MIG / MAG welding. *Svarka i diagnostika*. 2014, no. 3, pp. 43–47. (In Russ.).
2. Smirnov A., Ozhiganov E., Baklanov D., Subbotin A., Oshchepkov N. Testing of pressure equipment for hazardous production facilities. *TekhNadzor*. 2015, no. 10 (107), pp. 72–75. (In Russ.).
3. Knyaz'kov V.L., Knyaz'kov A.F. *Improving Efficiency of Pipelines Manual Arc Welding*. Kemerovo: KuzSTU, 2008, 104 p. (In Russ.).

4. Чепрасов Д.П. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений. Барнаул: изд. АлтГТУ, 2011. 108 с.
5. Физическая природа формирования и эволюции градиентных структурно-фазовых состояний в сталях и сплавах / В.В. Коваленко, Э.В. Козлов, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. Новокузнецк: ООО «Полиграфист», 2009. 557 с.
6. Конева Н.А., Козлов Э.В. Дислокационная структура и физические механизмы упрочнения металлических материалов // Перспективные материалы / Под ред. Д.Л. Мерсона. Тула: изд. ТГУ, МИСиС, 2006. С. 267–320.
7. Конева Н.А., Тришкина Л.И., Козлов Э.В. Физика субструктурного и зернограничного упрочнения // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2014. Т. 11. № 1. С. 40–49.
8. Смирнов А.Н., Козлов Э.В. Субструктура, внутренние поля напряжений и проблема разрушения паропроводов из стали 12Х1МФ. Кемерово: Кузбассвузиздат, 2004. 163 с.
9. Смирнов А.Н., Данилов В.И., Ожиганов Е.А., Горбатенко В.В., Муравьев В.В. Зависимость локальных деформаций и полей внутренних напряжений от способа сварки конструкционной стали ВСтЗсп. 1. Влияние способа сварки на механические характеристики и параметры акустической эмиссии стали ВСтЗсп // Дефектоскопия. 2015. № 11. С. 59–67.
10. Okayasu M., Tomida S. Phase transformation system of austenitic stainless steels obtained by permanent compressive strain // *Materials Science and Engineering: A*. 2017. Vol. 684. P. 712–725. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.12.101>
11. Ullrich C., Eckner R., Krüger L., Martin S., Klemm V., Rafaja D. Interplay of microstructure defects in austenitic steel with medium stacking fault energy // *Materials Science and Engineering: A*. 2016. Vol. 649. P. 390–399. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.021>
12. Eskandari M., Zarei-Hanzaki A., Mohtadi-Bonab M.A., Onuki Y., Basu R., Asghari A., Szpunar J.A. Grain-orientation-dependent of  $\gamma$ - $\epsilon$ - $\alpha'$  transformation and twinning in a super-high-strength, high ductility austenitic Mn-steel // *Materials Science and Engineering: A*. 2016. Vol. 674. P. 514–528. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.08.024>
13. Cai Z.H., Ding H., Tang Z.Y., Misra R.D.K. Significance of control of austenite stability and transformation mechanisms in medium-manganese transformation-induced plasticity steel // *Materials Science and Engineering: A*. 2016. Vol. 676. P. 289–293. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.08.124>
14. Rafaja D., Krbetschek C., Ullrich C., Martin S. Stacking fault energy in austenitic steels determined by using in situ X-ray diffraction during bending // *Journal of Applied Crystallography*. 2014. Vol. 47. P. 936–947. <https://doi.org/10.1107/S1600576714007109>
15. Moallemi M., Kermanpur A., Najafizadeh A., Rezaee A., Baghbadorani H.S., Nezhadfar P.D. Deformation-induced martensitic transformation in a 201 austenitic steel: The synergy of stacking fault energy and chemical driving force // *Materials Science and Engineering: A*. 2016. Vol. 653. P. 147–152. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.12.006>
16. Park M.C., Kim K.N., Yun J.Y., Shin G.S., Kim S.J. Strain-induced  $\epsilon/\alpha'$  martensitic transformation behavior and solid particle erosion resistance of austenitic Fe–Cr–C–Mn/Ni alloys // *Tribology Letters*. 2014. Vol. 54. No. 1. P. 51–58. <https://doi.org/10.1007/s11249-014-0306-3>
17. Krüger L., Wolf S., Martin S., Martin U., Jahn A., Weiß A., Scheller P.R. Strain rate dependent flow stress and energy absorption behaviour of cast CrMnNi TRIP/TWIP steels // *Steel Research International*. 2011. Vol. 82. No. 9. P. 1087–1093. <https://doi.org/10.1002/srin.201100067>
18. Sudha C., Prasanthi T.N., Paul V.T., Saroja S., Vijayalakshmi M. Metastable phase transformation in Ti-5Ta-2Nb alloy and 304L austenitic stainless steel under explosive cladding conditions // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012. Vol. 43. No. 10. P. 3596–3607. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1198-1>
4. Cheprasov D.P. *Metal Science of Welding and Heat Treatment of Welded Joints*. Barnaul: AltSTU, 2011, 108 p. (In Russ.)
5. Kovalenko V.V., Kozlov E.V., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. *Physical Nature of Formation and Evolution of Gradient Structural-Phase States in Steels and Alloys*. Novokuznetsk: ООО “Poligrafist”, 2009, 557 p. (In Russ.)
6. Koneva N.A., Kozlov E.V. Dislocation Structure and Physical Mechanisms of Metallic Materials Strengthening. *Advanced Materials*. Merson D.L. ed. Tula: izd. TSU, MISiS, 2006, pp. 267–320. (In Russ.)
7. Koneva N.A., Trishkina L.I., Kozlov E.V. Physics of substructural and grain-boundary strengthening. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2014, vol. 11, no. 1, pp. 40–49. (In Russ.)
8. Smirnov A.N., Kozlov E.V. *Substructure, Internal Stress Fields and Destruction of Steam Pipelines from 12Kh1MF Steel*. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat, 2004, 163 p. (In Russ.)
9. Smirnov A.N., Danilov V.I., Ozhiganov E.A., Gorbatenko V.V., Murav'ev V.V. The dependence of local deformations and internal stress fields on welding technique for grade VSt3sp structural steel: I. The influence of welding technique on the mechanical characteristics and acoustic emission parameters of grade VSt3sp steel. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2015, vol. 51, no. 11, pp. 705–712. <https://doi.org/10.1134/S1061830915110066>
10. Okayasu M., Tomida S. Phase transformation system of austenitic stainless steels obtained by permanent compressive strain. *Materials Science and Engineering: A*. 2017, vol. 684, pp. 712–725. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.12.101>
11. Ullrich C., Eckner R., Krüger L., Martin S., Klemm V., Rafaja D. Interplay of microstructure defects in austenitic steel with medium stacking fault energy. *Materials Science and Engineering: A*. 2016, vol. 649, pp. 390–399. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.021>
12. Eskandari M., Zarei-Hanzaki A., Mohtadi-Bonab M.A., Onuki Y., Basu R., Asghari A., Szpunar J.A. Grain-orientation-dependent of  $\gamma$ - $\epsilon$ - $\alpha'$  transformation and twinning in a super-high-strength, high ductility austenitic Mn-steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2016, vol. 674, pp. 514–528. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.08.024>
13. Cai Z.H., Ding H., Tang Z.Y., Misra R.D.K. Significance of control of austenite stability and transformation mechanisms in medium-manganese transformation-induced plasticity steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2016, vol. 676, pp. 289–293. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.08.124>
14. Rafaja D., Krbetschek C., Ullrich C., Martin S. Stacking fault energy in austenitic steels determined by using in situ X-ray diffraction during bending. *Journal of Applied Crystallography*. 2014, vol. 47, pp. 936–947. <https://doi.org/10.1107/S1600576714007109>
15. Moallemi M., Kermanpur A., Najafizadeh A., Rezaee A., Baghbadorani H.S., Nezhadfar P.D. Deformation-induced martensitic transformation in a 201 austenitic steel: The synergy of stacking fault energy and chemical driving force. *Materials Science and Engineering: A*. 2016, vol. 653, pp. 147–152. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.12.006>
16. Park M.C., Kim K.N., Yun J.Y., Shin G.S., Kim S.J. Strain-induced  $\epsilon/\alpha'$  martensitic transformation behavior and solid particle erosion resistance of austenitic Fe–Cr–C–Mn/Ni alloys. *Tribology Letters*. 2014, vol. 54, no. 1, pp. 51–58. <https://doi.org/10.1007/s11249-014-0306-3>
17. Krüger L., Wolf S., Martin S., Martin U., Jahn A., Weiß A., Scheller P.R. Strain rate dependent flow stress and energy absorption behaviour of cast CrMnNi TRIP/TWIP steels. *Steel Research International*. 2011, vol. 82, no. 9, pp. 1087–1093. <https://doi.org/10.1002/srin.201100067>
18. Sudha C., Prasanthi T.N., Paul V.T., Saroja S., Vijayalakshmi M. Metastable phase transformation in Ti-5Ta-2Nb alloy and 304L austenitic stainless steel under explosive cladding conditions. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012, vol. 43, no. 10, pp. 3596–3607. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1198-1>

19. Chen A.Y., Ruan H.H., Wang J., Chan H.L., Wang Q., Li Q., Lu J. The influence of strain rate on the microstructure transition of 304 stainless steel // *Acta Materialia*. 2011. Vol. 59. No. 9. P. 3697–3709. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.03.005>
20. Martin S., Wolf S., Martin U., Krüger L., Rafaja D. Deformation mechanisms in austenitic TRIP/TWIP steel as a function of temperature // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2016. Vol. 47. No. 1. P. 49–58. <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2684-4>
19. Chen A.Y., Ruan H.H., Wang J., Chan H.L., Wang Q., Li Q., Lu J. The influence of strain rate on the microstructure transition of 304 stainless steel. *Acta Materialia*. 2011, vol. 59, no. 9, pp. 3697–3709. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.03.005>
20. Martin S., Wolf S., Martin U., Krüger L., Rafaja D. Deformation mechanisms in austenitic TRIP/TWIP steel as a function of temperature. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2016, vol. 47, no. 1, pp. 49–58. <https://doi.org/10.1007/s11661-014-2684-4>

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Александр Николаевич Смирнов**, д.т.н., профессор кафедры «Технологии машиностроения», Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

ORCID: 0000-0002-0342-3055

E-mail: galvas.kem@gmail.com

**Наталья Анатольевна Попова**, к.т.н., старший научный сотрудник кафедры физики, Томский государственный архитектурно-строительный университет

ORCID: 0000-0001-8823-4562

E-mail: Popova@tici.tomsk.ru

**Николай Викторович Абабков**, к.т.н., доцент кафедры «Технологии машиностроения», Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

ORCID: 0000-0003-0794-8040

E-mail: n.ababkov@rambler.ru

**Константин Викторович Князьков**, к.т.н., доцент кафедры «Технологии машиностроения», Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

ORCID: 0000-0001-7008-4244

E-mail: koss233@gmail.com

**Елена Леонидовна Никоненко**, к.т.н., доцент кафедры физики, химии и теоретической механики, Томский государственный архитектурно-строительный университет

ORCID: 0000-0002-0396-9541

E-mail: vilatomsk@mail.ru

**Aleksandr N. Smirnov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair “Engineering Technology”, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

ORCID: 0000-0002-0342-3055

E-mail: galvas.kem@gmail.com

**Natalya A. Popova**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Chair of Physics, Tomsk State University of Architecture and Building

ORCID: 0000-0001-8823-4562

E-mail: Popova@tici.tomsk.ru

**Nikolai V. Ababkov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Engineering Technology”, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

ORCID: 0000-0003-0794-8040

E-mail: n.ababkov@rambler.ru

**Konstantin V. Knyaz'kov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Engineering Technology”, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

ORCID: 0000-0001-7008-4244

E-mail: koss233@gmail.com

**Elena L. Nikonenko**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Physics, Chemistry and Theoretical Mechanics, Tomsk State University of Architecture and Building

ORCID: 0000-0002-0396-9541

E-mail: vilatomsk@mail.ru

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**А.Н. Смирнов** – формирование концепции статьи, определение цели и задач статьи. Написание введения и выводов. Редактирование финальной версии статьи.

**Н.А. Попова** – анализ структуры металла сварных соединений ручной дуговой сваркой, импульсной сваркой с мелкокапельным переносом, крупнокапельным переносом с искусственными дефектами и без дефектов и после деформации до 5 и 12 % в зоне линии сплавления на расстоянии 0,5 мм от нее в металле шва и 1,0 мм в зоне термического влияния.

**Н.В. Абабков** – определение химического состава пластин из стали 12Х18Н10Т (ГОСТ 5949 – 2018). Проведение механических испытаний на одноосное растяжение до деформации 5 и 12 %. Редактирование финальной версии статьи.

**К.В. Князьков** – подготовка образцов сварных соединений из стали 12Х18Н10Т (ГОСТ 5949 – 2018), выполненных ручной дуговой сваркой, импульсной сваркой с мелкокапельным переносом (МК), крупнокапельным переносом с искусственными дефектами и без дефектов.

**Е.Л. Никоненко** – анализ структуры металла сварных соединений ручной дуговой сваркой, импульсной сваркой с мелкокапельным переносом, крупнокапельным переносом с искусственными дефектами и без дефектов и после деформации до 5 и 12 % в зоне линии сплавления на расстоянии 0,5 мм от нее в металле шва и 1,0 мм в зоне термического влияния.

Поступила в редакцию 17.07.2020

После доработки 15.09.2020

Принята к публикации 26.10.2020

Received 17.07.2020

Revised 15.09.2020

Accepted 26.10.2020



Оригинальная статья

УДК 669.187.28.539.55

DOI 10.17073/0368-0797-2021-8-581-587



## ПРЯМОЕ МИКРОЛЕГИРОВАНИЕ СТАЛИ ЦЕРИЕМ ПОД ШЛАКАМИ СИСТЕМЫ $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - 15\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ВОССТАНОВИТЕЛЯМИ

А. Г. Уполовникова, А. А. Бабенко, Л. А. Смирнов, Л. Ю. Михайлова

■ Институт металлургии УрО РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

**Аннотация.** Оценка возможности прямого микролегирувания стали церием выполнена с помощью термодинамического моделирования восстановления церия из шлаков системы  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3$ , содержащих 15 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 8 %  $\text{MgO}$ , дополнительными присадками восстановителей (алюминия или ферросиликоалюминия), при температурах 1550 и 1650 °С с использованием программного комплекса HSC 6.1 Chemistry (Outokumpu). Показано, что в зависимости от дополнительных присадок алюминия или ферросиликоалюминия, температуры металла, основности шлака и содержания оксида церия в металл переходит от 0,228 до 40,5 ppm церия. При дополнительной присадке алюминия из шлака ( $Y_1$ ), содержащего 1,0 % оксида церия, в металл при 1550 °С переходит 0,228 ppm церия. Повышение температуры системы до 1650 °С сопровождается незначительным увеличением концентрации церия, достигающей не более 0,323 ppm. При присадке в металл ферросиликоалюминия содержание церия в металле выше и составляет 0,402 и 0,566 ppm при 1550 и 1650 °С соответственно. При увеличении до 7,0 % концентрации оксида церия в шлаке ( $Y_2$ ) наблюдается более существенный прирост содержания церия в металле, достигающий в диапазоне температур 1550 – 1650 °С, 1,65 – 2,31 ppm с присадками алюминия и 2,90 – 4,05 ppm с присадками ферросиликоалюминия. Наиболее ощутимое повышение содержания церия в металле наблюдается с ростом основности шлака. При формировании шлаков в области основности 2 – 3, содержащих 1 – 7 %  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ , равновесная концентрация церия в металле изменяется от 0,5 до 4 ppm с присадками алюминия и 1 – 7 ppm с присадками ферросиликоалюминия при 1550 °С. Смещение шлаков в область повышенной до 3 – 5 основности сопровождается при содержании 3 – 7 %  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  повышением равновесной концентрации церия в металле до 4 – 12 ppm с присадками алюминия и 7 – 20 ppm с присадками ферросиликоалюминия и, как следствие, повышением эффективности протекания процесса восстановления церия.

**Ключевые слова:** сталь, церий, шлак, основность, оксид церия, фазовый состав, планирование эксперимента, термодинамическое моделирование

**Финансирование:** Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00825.

**Для цитирования:** Уполовникова А.Г., Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Михайлова Л.Ю. Прямое микролегирувание стали церием под шлаками системы  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - 15\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$  дополнительными восстановителями // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 8. С. 581–587. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-581-587>

Original article

## DIRECT MICROALLOYING OF STEEL WITH CERIUM UNDER SLAGS OF $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - 15\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$ SYSTEM WITH ADDITIONAL REDUCING AGENTS

A. G. Upolovnikova, A. A. Babenko, L. A. Smirnov, L. Yu. Mikhailova

■ Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

**Abstract.** An assessment of the possibility of steel direct microalloying with cerium was performed using thermodynamic modeling of cerium reduction from slags of  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3$  system containing 15 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and 8 %  $\text{MgO}$ , additional additives of reducing agents (aluminum or ferrosilicoaluminium), at temperatures of 1550 and 1650 °C using the HSC 6.1 Chemistry (Outokumpu) software package. Depending on the additional additives of aluminum or ferrosilicoaluminium, metal temperature, slag basicity and content of cerium oxide, 0.228 to 40.5 ppm of cerium transfers into the metal. With an additional additive of aluminum from slag ( $Y_1$ ) containing 1.0 % of cerium oxide, 0.228 ppm of cerium is transferred to the metal at 1550 °C. An increase in the system temperature to 1650 °C is accompanied by a slight increase in cerium content, reaching no more than 0.323 ppm. When added to ferrosilicoaluminium metal, cerium content in the metal is higher and amounts to 0.402 and 0.566 ppm at 1550 and 1650 °C, respectively. When concentration of cerium oxide in the slag ( $Y_2$ ) increases to 7.0 %, more significant increase in cerium content in the metal is observed, reaching in temperature range of 1550 – 1650 °C, 1.65 – 2.31 ppm with aluminum additives and 2.90 – 4.05 ppm with ferrosilicoaluminium additives. The most noticeable increase in cerium content in the metal is observed with an increase in slag basicity. During formation of slags with basicity of 2 – 3, containing 1 – 7 %  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ , the equilibrium concentration of cerium in the metal varies from 0.5 to 4 ppm with aluminum additives and 1 – 7 ppm

with ferro-silicoaluminium additives at 1550 °C. Slags transfer to the increased (up to 3 – 5) basicity is accompanied by an increase in the equilibrium content of cerium in the metal to 4 – 12 ppm with aluminum additives and 7 – 20 ppm with ferrosilicoaluminium additives at  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  content of 3 – 7 % and, as a result, an increase in efficiency of cerium reduction process.

**Keywords:** steel, gray, slag, basicity, cerium oxide, phase composition, experiment planning, thermodynamic modeling

**Funding:** The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant No. 19-08-00825.

**For citation:** Upolovnikova A.G., Babenko A.A., Smirnov L.A., Mikhailova L.Yu. Direct microalloying of steel with cerium under slags of  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - 15\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$  system with additional reducing agents. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 8, pp. 581–587. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-581-587>

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с увеличением протяженности магистральных газопроводов на территории России все более актуальными являются исследования и разработка трубных сталей с комплексом высоких механических свойств. Одним из направлений решения проблемы производства высокопрочных трубных сталей является микролегирование стали редкоземельными металлами (РЗМ). Микролегирование стали РЗМ обеспечивает необходимый комплекс механических свойств [1 – 5].

Особо отмечается положительное влияние РЗМ на прочность, пластичность, ударную вязкость и стойкость к циклическому растрескиванию трубной стали 17Г1С. Показано, что высокая стойкость к общей и точечной коррозии, а также к сульфидному напряженно-коррозионному разрушению низколегированных сталей и сварных соединений может быть достигнута путем микролегирования стали РЗМ [3]. Срок службы труб из стали 17Г1С с РЗМ увеличивается на стадии роста усталостных трещин вследствие увеличения вязкости при циклическом разрушении стали. Согласно данным работы [4] в результате модифицирования стали марки 17Г1С церием из расчета 0,01 – 0,06 % существенно повысилась хрупкая прочность и достигнуто оптимальное соотношение хрупкой прочности и запаса вязкости. Введение церия и лантана в низкоуглеродистую сталь способствует образованию мелкозернистой структуры, поскольку РЗМ образуют неметаллические включения в расплавленной стали, которые служат гетерогенными центрами зародышеобразования во время затвердевания [5].

Микролегирование стали РЗМ осуществляют, как правило, за счет присадок ферросплавов, использование которых увеличивает себестоимость стали. Одним из направлений решения проблемы себестоимости может быть микролегирование стали РЗМ путем их восстановления из оксидных систем. Кроме того, отмечается положительное влияние  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  на физико-химические и рафинировочные свойства шлаков  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ , структуру и механические свойства получаемого металла [6 – 15].

Так, добавление к шлаку  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  снижает активность  $\text{Al}_2\text{O}_3$  из-за образования соединения  $\text{Ce}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  [6] и тем самым позволяет повысить поглощаемость включений  $\text{Al}_2\text{O}_3$  рафинирующим шлаком [9]. Показано, что температура плавления и вязкость шлака снижаются

с увеличением количества добавок  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  с массовым соотношением  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  на уровне 1,57. Диапазон вязкости шлаковой системы  $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3$  составляет от 0,289 до 0,497 Па·с при 1500 °C [7]. Микроструктура выплавленного металла при добавлении оксидов РЗМ в шлак измельчается и состоит из феррита и небольшого количества перлита. Полученный металл характеризуется наименьшим (5 – 10 мкм) размером зерна при добавках в шлак оксида РЗМ в количестве 5,94 % (по массе) [8].

Добавление оксидов редкоземельных элементов в шлаки состава  $\text{CaO} - \text{SiO}_2$  эффективно для увеличения сульфидной емкости. Например, добавка 1,83 %  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  (мол.) увеличивает сульфидную емкость примерно на 50 % для шлака основности 1,22 [10].

Кроме того, отмечается возможность восстановления церия из шлака изучаемой оксидной системы и растворения церия в стали в количестве 6 ppm, что имело эффект микролегирования в стали и модификации включения  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [11]. Термодинамический анализ показал, что включения типа  $\text{Ce}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  будут образовываться с содержанием церия в диапазоне от 6,7 ppm до 3,6 ppm, когда содержание алюминия составляет 0,01 % (по массе) [12]. В работах [16, 17] подтверждена принципиальная возможность развития процесса восстановления церия из шлаков системы  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - 15\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$  алюминием, растворенным в металле. Показано, что в зависимости от температуры металла, основности шлака и содержания оксида церия в сталь, содержащую 0,06 % С, 0,25 % Si, 0,05 % Al, переходит от 0,055 до 16,0 ppm церия.

В настоящей работе предпринята попытка, используя результаты термодинамического моделирования, оценить возможность и полноту протекания реакций восстановления церия из шлаков системы  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - 15\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$  дополнительными присадками в металл алюминия или ферросиликоалюминия при температурах 1550 и 1650 °C.

## МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Оценка возможности прямого микролегирования стали церием выполнена с помощью термодинамического моделирования восстановления церия из шлаков системы  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3$ , содержащих 15 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 8 % MgO, дополнительными присадками алюми-

ния или ферросиликоалюминия при температурах 1550 и 1650 °С. Использован программный комплекс HSC 6.1 Chemistry (Outokumpu), основанный на минимизации энергии Гиббса и вариационных принципах термодинамики [16–18], применен метод симплексных решеток планирования [19, 20]. При построении матрицы планирования на переменные составляющие системы  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Ce}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}$  были наложены ограничения:  $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 2 \div 5$ ; 15 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 8 %  $\text{MgO}$ ; 1–7 %  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ . В результате наложения ограничений на изменение компонентов в системе исследованная область представлена локальным симплексом в виде двух концентрационных треугольников, вершинами которых являются псевдокомпоненты  $Y_1, Y_2, Y_3$  и  $Y_4$  (рис. 1).

Термодинамическое моделирование выполнено для рабочей массы тела 100 кг (90 % металла и 10 % шлака) при давлении воздуха окружающей среды в системе 0,1 МПа. Химический состав шлака в точках локального симплекса и результаты моделирования равновесного содержания церия в металле, содержащем 0,06 % С, 0,25 % Si и 0,05 % Al, приведены в таблице. В металл добавляли присадки вторичного алюминия или ферросиликоалюминия в количествах, обеспечивающих концентрацию алюминия в металле 0,15 и 0,20 % соответственно.

**Химический состав шлака в точках локального симплекса и результаты термодинамического моделирования равновесного содержания церия в металле**

**Chemical composition of the slag at the local simplex points and results of thermodynamic modeling of cerium equilibrium content in the metal**

| №  | Индекс<br>шлака | Химический состав шлака,<br>% (по массе) |                  |                                |     |                                | Содержание церия, ppm, при температуре, °С |        |                                 |        |
|----|-----------------|--|------------------|--------------------------------|-----|--------------------------------|--|--------|---------------------------------|--------|
|    |                 | CaO                                      | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO | Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | присадка<br>алюминия                       |        | присадка<br>ферросиликоалюминия |        |
|    |                 |  |                  |                                |     |                                | 1550                                       | 1650   | 1550                            | 1650   |
| 1  | $pY_1$          | 50,7                                     | 25,3             | 15,0                           | 8,0 | 1,0                            | 0,228                                      | 0,323  | 0,402                           | 0,566  |
| 2  | $Y_2$           | 63,3                                     | 12,7             | 15,0                           | 8,0 | 1,0                            | 2,920                                      | 4,060  | 4,960                           | 6,900  |
| 3  | $Y_3$           | 58,3                                     | 11,7             | 15,0                           | 8,0 | 7,0                            | 17,700                                     | 24,000 | 29,900                          | 40,500 |
| 4  | $Y_4$           | 46,7                                     | 23,3             | 15,0                           | 8,0 | 7,0                            | 1,650                                      | 2,310  | 2,900                           | 4,050  |
| 5  | $Y_{13}$        | 59,1                                     | 16,9             | 15,0                           | 8,0 | 1,0                            | 1,320                                      | 1,850  | 2,260                           | 3,1600 |
| 6  | $Y_{132}$       | 56,0                                     | 16,0             | 15,0                           | 8,0 | 5,0                            | 6,310                                      | 8,740  | 10,800                          | 14,90  |
| 7  | $Y_{22}$        | 60,0                                     | 12,0             | 15,0                           | 8,0 | 5,0                            | 13,300                                     | 18,200 | 22,500                          | 30,700 |
| 8  | $Y_{12}$        | 54,9                                     | 21,1             | 15,0                           | 8,0 | 1,0                            | 0,586                                      | 0,823  | 1,010                           | 1,410  |
| 9  | $Y_{121}$       | 53,2                                     | 20,8             | 15,0                           | 8,0 | 3,0                            | 1,660                                      | 2,320  | 2,870                           | 3,990  |
| 10 | $Y_{21}$        | 61,6                                     | 12,4             | 15,0                           | 8,0 | 3,0                            | 8,260                                      | 11,400 | 14,000                          | 19,300 |
| 11 | $Y_{131}$       | 57,5                                     | 16,5             | 15,0                           | 8,0 | 3,0                            | 3,840                                      | 5,340  | 6,5600                          | 9,100  |
| 12 | $Y_{41}$        | 48,0                                     | 24,0             | 15,0                           | 8,0 | 5,0                            | 1,150                                      | 1,630  | 2,04                            | 2,850  |
| 13 | $Y_{31}$        | 54,5                                     | 15,5             | 15,0                           | 8,0 | 7,0                            | 8,730                                      | 12,000 | 14,900                          | 20,400 |
| 14 | $Y_{42}$        | 49,4                                     | 24,6             | 15,0                           | 8,0 | 3,0                            | 0,698                                      | 0,985  | 1,230                           | 1,720  |
| 15 | $Y_{32}$        | 50,5                                     | 19,5             | 15,0                           | 8,0 | 7,0                            | 3,970                                      | 5,530  | 6,860                           | 9,490  |
| 16 | $Y_{122}$       | 51,9                                     | 20,1             | 15,0                           | 8,0 | 5,0                            | 2,830                                      | 3,950  | 4,890                           | 6,780  |

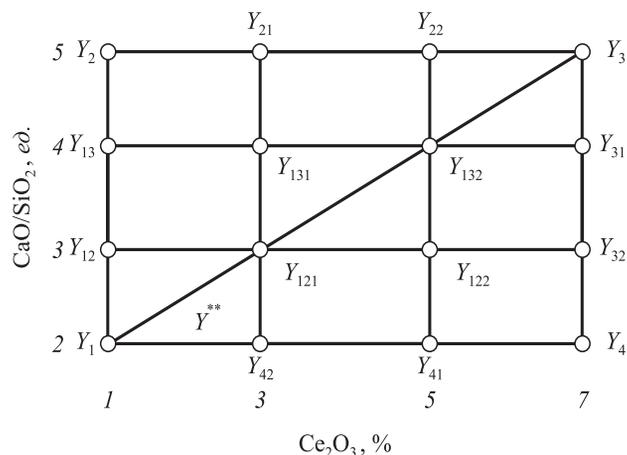


Рис. 1. Область варьирования состава шлака локального симплекса

Fig. 1. Area of variation of the slag composition of the local simplex

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ**

Результаты термодинамического моделирования восстановления церия из шлаков системы  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Ce}_2\text{O}_3$ , содержащих 15 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 8 %  $\text{MgO}$ , приведены в таблице и представлены в виде диаграмм состав – свойство (равновесное содержание церия в металле)

при температурах 1550 и 1650 °С с присадками алюминия (рис. 2) и ферросиликоалюминия (рис. 3) (на диаграммах синими линиями обозначены изолинии равновесного содержания церия, тонкими черными линиями – основность шлака ( $B = \text{CaO}/\text{SiO}_2$ ), цифрами – их величина). Анализ диаграмм позволяет количественно оценить влияние температуры металла и химического состава шлака на содержание церия.

В зависимости от присадок восстановителей (алюминия или ферросиликоалюминия), температуры металла, основности шлака и содержания оксида церия в металл переходит от 0,228 до 40,5 ppm церия (см. таблицу). При дополнительной присадке алюминия из шлака ( $Y_1$ ), содержащего 1,0 % оксида церия, в металл при температуре 1550 °С переходит 0,228 ppm церия. Повышение температуры системы до 1650 °С сопровождается незначительным увеличением концентрации церия, достигающей не более 0,323 ppm. При присад-

ке в металл ферросиликоалюминия содержание церия в металле выше и составляет 0,402 и 0,566 ppm при температуре 1550 и 1650 °С соответственно. При увеличении до 7,0 % концентрации оксида церия в шлаке ( $Y_2$ ) наблюдается более существенный прирост содержания церия в металле, достигающий в диапазоне температур 1550 – 1650 °С 1,65 – 2,31 ppm при использовании присадок алюминия и 2,9 – 4,05 ppm при использовании присадок ферросиликоалюминия.

Наиболее ощутимое повышение содержания церия в металле наблюдается с ростом основности шлака. При формировании шлаков, содержащих 1 – 7 %  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ , в области основности 2 – 3 равновесная концентрация церия в металле изменяется от 0,5 до 4 ppm при использовании присадок алюминия (рис. 2, а) и 1 – 7 ppm при использовании присадок ферросиликоалюминия (рис. 3, а) при температуре 1550 °С. Смещение шлаков в область повышенной до 3 – 5 основности сопровож-

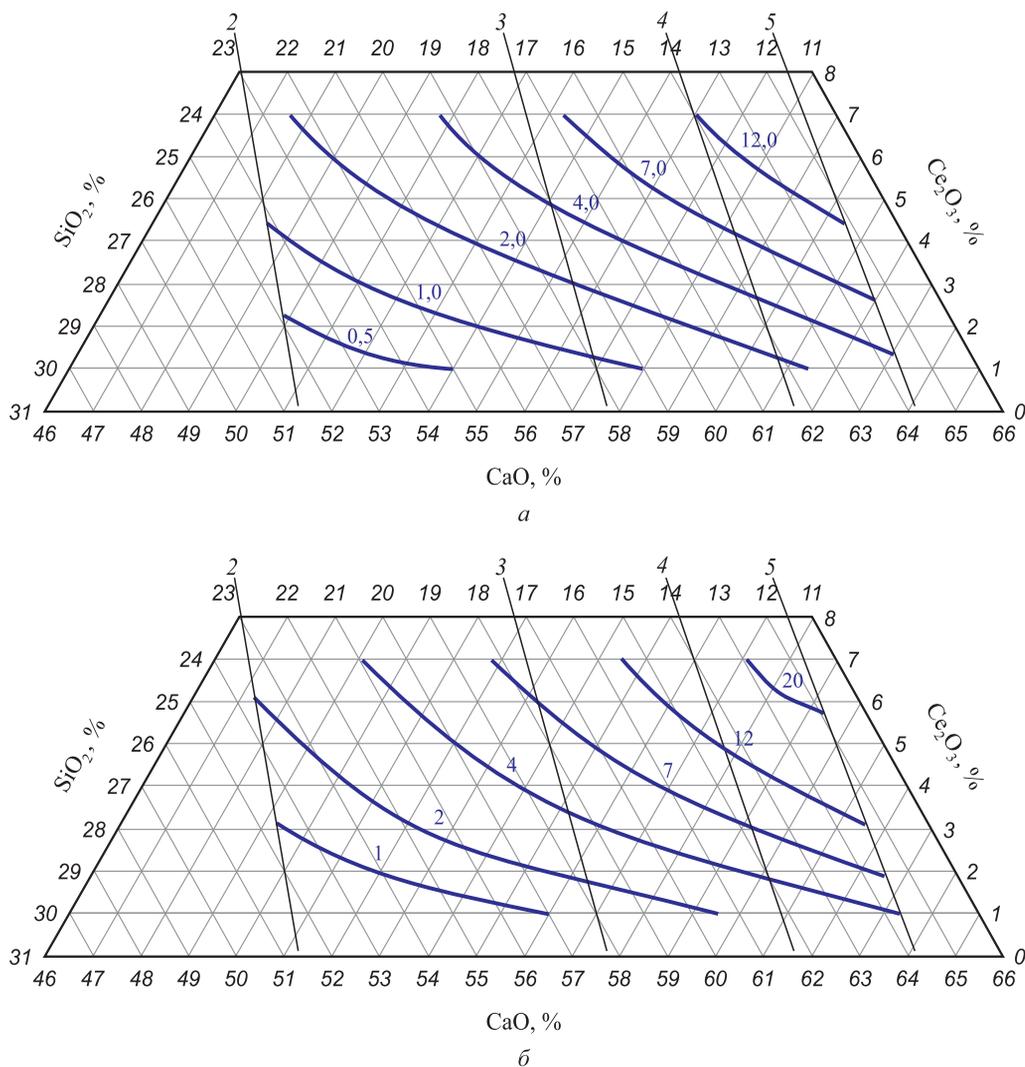


Рис. 2. Диаграмма равновесного содержания церия в металле, выдержанном под шлаком системы  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Ce}_2\text{O}_3$ , содержащим 15 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 8 %  $\text{MgO}$ , при температуре 1550 °С (а) и 1650 °С (б) с присадкой алюминия

Fig. 2. Diagram of cerium equilibrium content in the metal held under the slag of  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Ce}_2\text{O}_3$  system containing 15 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and 8 %  $\text{MgO}$  at temperatures of 1550 °С (а) and 1650 °С (б) with an aluminum additive

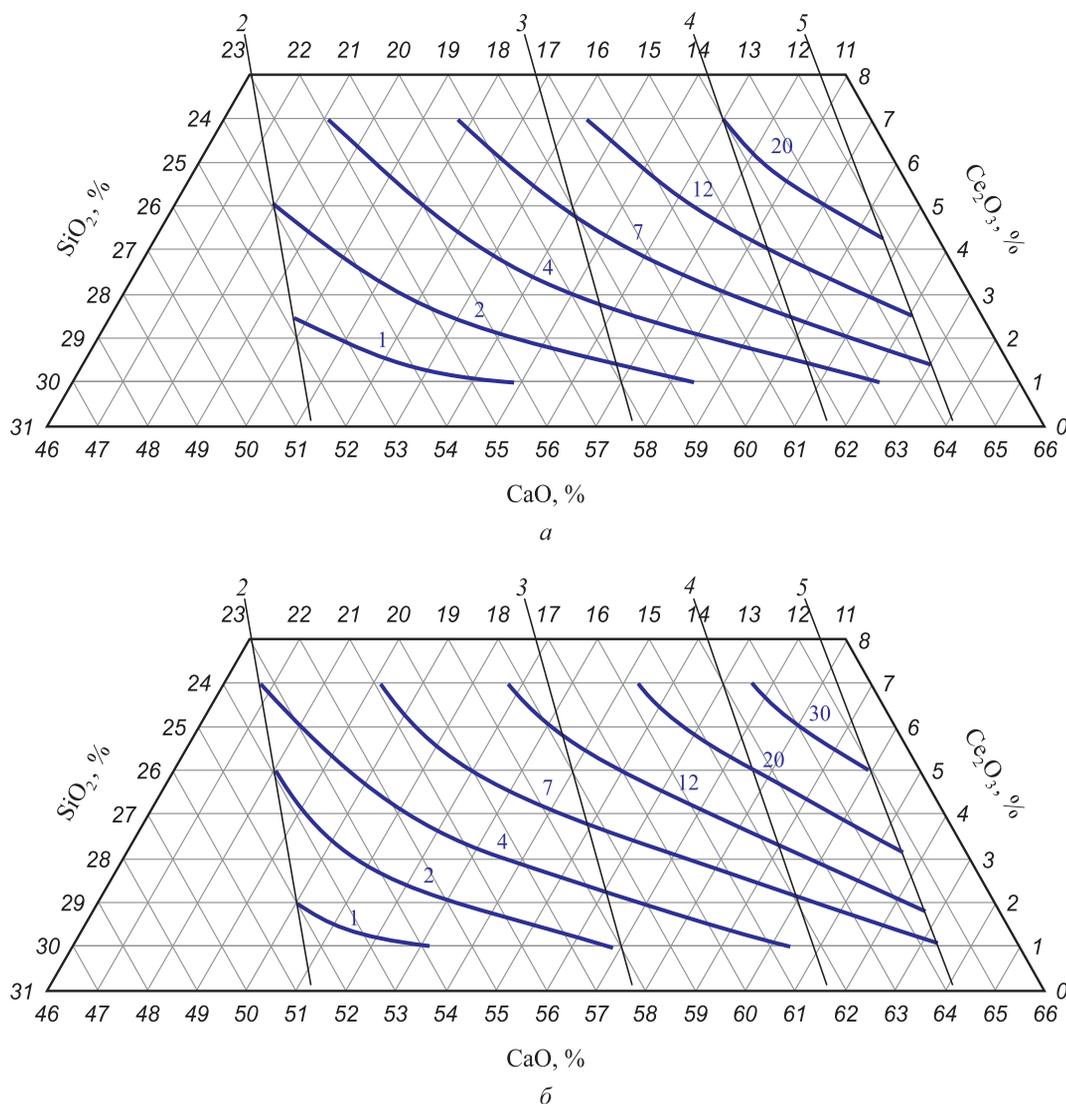


Рис. 3. Диаграмма равновесного содержания церия в металле, выдержанном под шлаком системы CaO–SiO<sub>2</sub>–Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, содержащим 15 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 8 % MgO, при температуре 1550 °C (а) и 1650 °C (б) с присадкой ферросиликоалюминия

Fig. 3. Diagram of cerium equilibrium content in the metal held under the slag of CaO–SiO<sub>2</sub>–Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system containing 15 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and 8 % MgO at temperatures of 1550 °C (a) and 1650 °C (b) with ferrosilicoaluminum additive

дается при содержании 3 – 7 % Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> повышением равновесной концентрации церия в металле до 4 – 12 ppm при использовании присадок алюминия и 7 – 20 ppm при использовании присадок ферросиликоалюминия и, как следствие, повышением эффективности протекания процесса восстановления церия. При температуре 1650 °C равновесная концентрация церия в металле в области основности 2 – 3 и содержании 1 – 7 % Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> изменяется в пределах 1 – 7 ppm при использовании присадок алюминия (рис. 2, б) и 1 – 12 ppm при использовании присадок ферросиликоалюминия (рис. 3, б). Смещение шлаков в область повышенной до 3 – 5 основности сопровождается при содержании 3 – 7 % Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> повышением равновесной концентрации церия в металле до 4 – 20 ppm при использовании присадок алюминия и 7 – 30 ppm при использовании присадок ферросиликоалюминия.

Положительное влияние температурного фактора, основности формируемых шлаков и содержания оксида церия в изучаемом диапазоне химического состава на процесс восстановления церия было качественно объяснено особенностями фазового состава формируемых шлаков и термодинамики химических реакций восстановления церия алюминием, растворенным в металле [16, 17].

### Выводы

Установлено, что в зависимости от температуры металла, основности шлака и содержания оксида церия в сталь, содержащую 0,06 % углерода, 0,25 % кремния и 0,05 % алюминия, при использовании дополнительных присадок вторичного алюминия или ферросиликоалюминия, обеспечивающими концентрацию

алюминия в металле 0,15 и 0,20 % соответственно, переходит от 0,228 до 40,5 ppm церия. Положительное влияние температурного фактора, основности шлаков и содержания оксида церия в изучаемом диапазоне хи-

мического состава на процесс восстановления церия обусловлена особенностями фазового состава формируемых шлаков и термодинамики реакций восстановления церия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

- Goldshtein Ya.G., Efimova L.B. Модифицирование и микролегирование чугуна и стали. М.: Metallurgiya, 1986. 271 с.
- Пилушенко В.Л., Вихлевщук В.А. Научные и технологические основы микролегирования стали. М.: Metallurgiya, 1994. 384 с.
- Petryna D.Yu., Kozak O.L., Shulyar B.R., Petryna Yu.D., Hredil M.I. Influence of alloying by rare-earth metals on the mechanical properties of 17G1S pipe steel // *Materials Science*. 2013. Vol. 4. No. 5. P. 575–581. <https://doi.org/10.1007/s11003-013-9540-3>
- Макаренко В.Д., Киндрачук М.В., Бондарев А.А., Муравьев К.А. Влияние церия на механические и коррозионные свойства низколегированных трубных сталей // *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. 2014. № 3. С. 24–29.
- Torkamani H., Raygan Sh., Garcia-Mateo C., Rassizadehghani J., Palizdar Y., San-Martin D. Evolution of pearlite microstructure in low-carbon cast microalloyed steel due to the addition of La and Ce // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2018. Vol. 49. No. 10. P. 4495–4508. <https://doi.org/10.1007/s11661-018-4796-8>
- Yang X., Long H., Cheng G., Wu C., Wu B. Effect of refining slag containing  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  on steel cleanliness // *Journal of Rare Earths*. 2011. Vol. 29. No. 11. P. 1079–1083. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60602-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60602-3)
- Wu C., Cheng G., Long H., Yang X. A thermodynamic model for evaluation of mass action concentrations of  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ -contained slag systems based on the ion and molecule coexistence theory // *High Temperature Materials and Processes*. 2013. Vol. 32. No. 3. P. 207–214. <https://doi.org/10.1515/htmp-2012-0119>
- Feifei H., Bo L., Da L., Ligang L., Ting D., Xuejun R., Qingxiang Y. Effects of rare earth oxide on hardfacing metal microstructure of medium carbon steel and its refinement mechanism // *Journal of Rare Earths*. 2011. Vol. 29. No. 6. P. 609–613. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60507-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60507-8)
- Guo M.X., Suito H. Effect of dissolved cerium on austenite grain growth in an Fe – 0.20 mass % C – 0.02 mas % P alloy // *ISIJ International*. 1999. Vol. 39. No. 11. P. 1169–1175. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.39.1169>
- Ueda S., Morita K., Sano N. Activity of  $\text{AlO}_{1.5}$  for the  $\text{CeO}_{1.5}$ – $\text{CaO}$ – $\text{AlO}_{1.5}$  system at 1773 K // *ISIJ International*. 1998. Vol. 38. No. 12. P. 1292–1296.
- Wu C., Cheng G., Long H. Effect of  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  and  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  on the phase, melting temperature and viscosity of  $\text{CaO}$ – $\text{Al}_2\text{O}_3$ –10 mass %  $\text{SiO}_2$  based slags // *High Temperature Materials and Processes*. 2014. Vol. 33. No. 1. P. 77–84. <https://doi.org/10.1515/htmp-2013-0025>
- Hao F., Liao B., Li D., Dan T., Ren X., Yang Q., Liu L. Effects of rare earth oxide on hardfacing metal microstructure of medium carbon steel and its refinement mechanism // *Journal of Rare Earths*. 2011. Vol. 29. No. 6. P. 609–613. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60507-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60507-8)
- Wang L.J., Wang Q., Li J.M., Chou K.C. Dissolution mechanism of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in refining slags containing  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  // *Journal of Mining and Metallurgy. Section B: Metallurgy*. 2016. Vol. 52. No. 1. P. 35–40. <https://doi.org/10.2298/JMMB140706004W>
- Anacleto N.M., Lee H.-G., Hayes P.C. Sulphur partition between  $\text{CaO}$ – $\text{SiO}_2$ – $\text{Ce}_2\text{O}_3$  slags and carbon-saturated iron // *ISIJ International*. 1993. Vol. 33. No. 5. P. 549–555. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.33.549>
- Михайлов Г.Г., Макровец Л.А., Смирнов Л.А. Термодинамическое моделирование фазовых равновесий с оксидными системами, содержащими РЗМ. Сообщение 3. Диаграммы состояния
- Goldshtein Ya.G., Efimova L.B. *Modification and Microalloying of Cast Iron and Steel*. Moscow: Metallurgiya, 1986, 271 p. (In Russ.).
- Pilyushenko V.L., Vikhlevshchuk V.A. *Scientific and Technological Foundations of Steel Microalloying*. Moscow: Metallurgiya, 1994, 384 p. (In Russ.).
- Petryna D.Yu., Kozak O.L., Shulyar B.R., Petryna Yu.D., Hredil M.I. Influence of alloying by rare-earth metals on the mechanical properties of 17G1S pipe steel. *Materials Science*. 2013, vol. 4, no. 5, pp. 575–581. <https://doi.org/10.1007/s11003-013-9540-3>
- Makarenko V.D., Kindrachuk M.V., Bondarev A.A., Murav'ev K.A. Influence of cerium on mechanical and corrosion properties of low alloyed pipe steels. *Kompressornoe i energeticheskoe mashinostroyeniye*. 2014, no. 3, pp. 24–29. (In Russ.).
- Torkamani H., Raygan Sh., Garcia-Mateo C., Rassizadehghani J., Palizdar Y., San-Martin D. Evolution of pearlite microstructure in low-carbon cast microalloyed steel due to the addition of La and Ce. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2018, vol. 49, no. 10, pp. 4495–4508. <https://doi.org/10.1007/s11661-018-4796-8>
- Yang X., Long H., Cheng G., Wu C., Wu B. Effect of refining slag containing  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  on steel cleanliness. *Journal of Rare Earths*. 2011, vol. 29, no. 11, pp. 1079–1083. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60602-3](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60602-3)
- Wu C., Cheng G., Long H., Yang X. A thermodynamic model for evaluation of mass action concentrations of  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ -contained slag systems based on the ion and molecule coexistence theory. *High Temperature Materials and Processes*. 2013, vol. 32, no. 3, pp. 207–214. <https://doi.org/10.1515/htmp-2012-0119>
- Feifei H., Bo L., Da L., Ligang L., Ting D., Xuejun R., Qingxiang Y. Effects of rare earth oxide on hardfacing metal microstructure of medium carbon steel and its refinement mechanism. *Journal of Rare Earths*. 2011, vol. 29, no. 6, pp. 609–613. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60507-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60507-8)
- Guo M.X., Suito H. Effect of dissolved cerium on austenite grain growth in an Fe – 0.20 mass % C – 0.02 mas % P alloy. *ISIJ International*. 1999, vol. 39, no. 11, pp. 1169–1175. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.39.1169>
- Ueda S., Morita K., Sano N. Activity of  $\text{AlO}_{1.5}$  for the  $\text{CeO}_{1.5}$ – $\text{CaO}$ – $\text{AlO}_{1.5}$  system at 1773 K. *ISIJ International*. 1998, vol. 38, no. 12, pp. 1292–1296.
- Wu C., Cheng G., Long H. Effect of  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  and  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  on the phase, melting temperature and viscosity of  $\text{CaO}$ – $\text{Al}_2\text{O}_3$ –10 mass %  $\text{SiO}_2$  based slags. *High Temperature Materials and Processes*. 2014, vol. 33, no. 1, pp. 77–84. <https://doi.org/10.1515/htmp-2013-0025>
- Hao F., Liao B., Li D., Dan T., Ren X., Yang Q., Liu L. Effects of rare earth oxide on hardfacing metal microstructure of medium carbon steel and its refinement mechanism. *Journal of Rare Earths*. 2011, vol. 29, no. 6, pp. 609–613. [https://doi.org/10.1016/S1002-0721\(10\)60507-8](https://doi.org/10.1016/S1002-0721(10)60507-8)
- Wang L.J., Wang Q., Li J.M., Chou K.C. Dissolution mechanism of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  in refining slags containing  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ . *Journal of Mining and Metallurgy. Section B: Metallurgy*. 2016, vol. 52, no. 1, pp. 35–40. <https://doi.org/10.2298/JMMB140706004W>
- Anacleto N.M., Lee H.-G., Hayes P.C. Sulphur partition between  $\text{CaO}$ – $\text{SiO}_2$ – $\text{Ce}_2\text{O}_3$  slags and carbon-saturated iron. *ISIJ International*. 1993, vol. 33, no. 5, pp. 549–555. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.33.549>
- Mikhailov G.G., Makrovets L.A., Smirnov L.A. Thermodynamic modeling of the phase equilibria with oxide systems containing rare-earth metals. Report 3. State diagrams of oxide systems with  $\text{Ce}_2\text{O}_3$

- оксидных систем с  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  и  $\text{CeO}_2$  // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2015. Т. 15. № 4. С. 5–14.  
<https://doi.org/10.14529/met150401>
16. Babenko A.A., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G., Nechvoglod O.V. Термодинамическое моделирование восстановления церия из шлаков системы  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - 15\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$  алюминием, растворенным в металле // Бултеровские сообщения. 2019. Т. 59. № 9. С. 140–145.
  17. Babenko A.A., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G., Михайлова Л.Ю. Построение диаграмм равновесного содержания церия в металле под шлаком системы  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - 15\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$  // Бултеровские сообщения. 2019. Т. 60. № 10. С. 140–145.
  18. Babenko A.A., Жучков В.И., Леонтьев Л.И., Уполовникова А.Г., Коньшев А.А. Равновесное распределение бора между металлом системы Fe-C-Si-Al и боросодержащим шлаком // Известия вузов. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 9. С. 752–758.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-7-752-758>
  19. Планирование эксперимента при исследовании физико-химических свойств металлургических шлаков. Методическое пособие / В.А. Ким, Э.И. Николай, А.А. Акбердин, И.С. Куликов. Алма-Ата: Наука, 1989. 116 с.
  20. Ким В.А., Акбердин А.А., Куликов И.С., Николай Э.И. Использование метода симплексных решеток для построения диаграмм типа состав – вязкость // Известия вузов. Черная металлургия. 1980. № 9. С. 167.
  - and  $\text{CeO}_2$ . *Vestnik YuUrGU. Seriya "Metallurgiya"*. 2015, vol. 15, no. 4, pp. 5–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/met150401>
  16. Babenko A.A., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G., Nechvoglod O.V. Thermodynamic modeling of cerium reduction from slags of  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - 15\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$  system with aluminum dissolved in metal. *Butlerovskie soobshcheniya*. 2019, vol. 59, no. 9, pp. 140–145. (In Russ.).
  17. Babenko A.A., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G., Mikhailova L.Yu. Construction of diagrams of equilibrium content of cerium in metal under slag of  $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Ce}_2\text{O}_3 - 15\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$  system. *Butlerovskie soobshcheniya*. 2019, vol. 60, no. 10, pp. 140–145. (In Russ.).
  18. Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Leont'ev L.I., Upolovnikova A.G., Konyshev A.A. Equilibrium distribution of boron between metal of Fe – C – Si – Al system and boron slag. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 9, pp. 752–758. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-7-752-758>
  19. Kim V.A., Nikolai E.I., Akberdin A.A., Kulikov I.S. *Planning an Experiment in Study of Physicochemical Properties of Metallurgical Slags. Manual*. Alma-Ata: Nauka, 1989, 116 p. (In Russ.).
  20. Kim V.A., Akberdin A.A., Kulikov I.S., Nikolai E.I. Use of simplex lattice method to construct composition-viscosity diagrams. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1980, no. 9, pp. 167. (In Russ.).

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Алена Геннадьевна Уполовникова**, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0002-6698-5565

E-mail: upol.ru@mail.ru

**Анатолий Алексеевич Бабенко**, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0003-0734-6162

E-mail: babenko251@gmail.com

**Леонид Андреевич Смирнов**, академик РАН, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0002-6324-4032

E-mail: uim@ural.ru

**Людмила Юрьевна Михайлова**, к.т.н., научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0002-9154-8244

E-mail: ferrostal@bk.ru

**Alena G. Upolovnikova**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

ORCID: 0000-0002-6698-5565

E-mail: upol.ru@mail.ru

**Anatolii A. Babenko**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

ORCID: 0000-0003-0734-6162

E-mail: babenko251@gmail.com

**Leonid A. Smirnov**, Academician, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

ORCID: 0000-0002-6324-4032

E-mail: uim@ural.ru

**Ljudmila Yu. Mikhailova**, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

ORCID: 0000-0002-9154-8244

E-mail: ferrostal@bk.ru

#### ВКЛАД АВТОРОВ:

**Уполовникова А.Г.** – термодинамический расчет, анализ, написание текста статьи.

**Бабенко А.А.** – анализ, корректировка текста статьи.

**Смирнов Л.А.** – корректировка статьи, научное руководство.

**Михайлова Л.Ю.** – построение диаграмм, оформление статьи.

Поступила в редакцию 23.03.2020

После доработки 13.04.2020

Принята к публикации 12.05.2021

Received 23.03.2020

Revised 13.04.2020

Accepted 12.05.2021



Оригинальная статья

УДК 669.162

DOI 10.17073/0368-0797-2021-8-588-598



## ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПИРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ: СОСТОЯНИЕ, НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Н. А. Спири́н<sup>1</sup>, В. В. Лавров<sup>1</sup>, В. Ю. Рыболовлев<sup>2</sup>, Д. А. Шнайдер<sup>2</sup>,  
А. В. Краснобаев<sup>2</sup>, И. А. Гури́н<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 28)

<sup>2</sup> ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (Россия, 455000, Челябинская обл., Магнитогорск, ул. Кирова, 93)

**Аннотация.** Приводится обзор и критический анализ процесса цифровизации ведущих российских предприятий черной металлургии в соответствии с концепцией развития «Индустрия 4.0». Она предусматривает создание цифровых двойников пирометаллургических технологий, широкое применение машинного зрения и искусственного интеллекта. Представлены примеры отечественных промышленных систем, используемых в производственном цикле технологии машинного (технического) зрения, цифровых помощников (двойников) металлургических агрегатов и их комплексов. Применительно к доменному производству рассмотрены системы технического зрения, используемые для контроля процессов в верхней и нижней зонах доменной печи. Перспективным направлением является интеграция систем технического зрения и поддержки принятия решений, включающих алгоритмы и программные модули реализации детерминированных математических моделей отдельных явлений доменной плавки. В их основу положены фундаментальные физические представления о процессах доменной плавки. Одним из основных направлений цифровой трансформации пирометаллургических технологий является создание интеллектуальных систем управления технологическим процессом агрегатов и их комплексов в металлургии в режиме реального времени. При постановке и решении задач требуются не только изучение характеристик, описывающих влияние изменения условий плавки на технико-экономические показатели работы отдельных печей, но и детальный анализ для математического описания внешних и внутренних ограничений. Представлены примеры подсистем контроля тепловых потерь доменной печи, прогнозирования параметров фурменных очагов и управления распределением дутьевых параметров по окружности доменной печи, автоматизированной системы анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха. Создание таких систем проведено на основе современных принципов и технологий разработки соответствующего математического, алгоритмического и программного обеспечения.

**Ключевые слова:** цифровая трансформация, интеллектуальные системы управления, цифровые двойники, машинное зрение, пирометаллургические технологии, технологические задачи, оптимизация, алгоритм, программное обеспечение

**Для цитирования:** Спири́н Н.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю., Шнайдер Д.А., Краснобаев А.В., Гури́н И.А. Цифровая трансформация пирометаллургических технологий: состояние, научные проблемы и перспективы развития // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 8. С. 588–598. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-588-598>

Original article

## DIGITAL TRANSFORMATION OF PYROMETALLURGICAL TECHNOLOGIES: STATE, SCIENTIFIC PROBLEMS AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT

N. A. Spirin<sup>1</sup>, V. V. Lavrov<sup>1</sup>, V. Yu. Rybolovlev<sup>2</sup>, D. A. Shnaider<sup>2</sup>,  
A. V. Krasnobaev<sup>2</sup>, I. A. Gurin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin (28 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russia)

<sup>2</sup> PJSC “Magnitogorsk Metallurgical Plant” (93 Kirova Str., Magnitogorsk, Chelyabinsk Region 455000, Russia)

**Abstract.** The article considers an overview and critical analysis of the digitalization of the leading Russian ferrous metallurgy enterprises in accordance with the Industry 4.0 development concept. It provides for the creation of digital twins of pyrometallurgical technologies, the widespread use of machine vision and artificial intelligence. The examples of domestic industrial systems using the technologies of machine (technical) vision in production cycle, digital assistants (twins) of metallurgical units and their sets are presented. With regard to blast-furnace production, technical vision systems used to control processes in the upper and lower zones of blast furnace are considered. A promising area is the integration of technical vision and decision support systems, including algorithms and software modules for implementation of deterministic mathematical models of individual phenomena of blast furnace smelting. They are based on fundamental physical concepts of blast-furnace smelting processes. One of the main directions of digital

transformation of pyrometallurgical technologies is creation of intelligent control systems for technological process in metallurgy in real time. When formulating and solving problems, it is required not only to study the characteristics describing the effect of change in melting conditions on technical and economic indicators of the operation of individual furnaces, but also a detailed analysis for mathematical description of external and internal constraints. The authors present the examples of subsystems for control of heat losses in a blast furnace, predicting the parameters of tuyere hearths and controlling distribution of blast parameters around the perimeter of a blast furnace, an automated system for analyzing and predicting production situations in a blast furnace. Creation of such systems was carried out on the basis of modern principles and technologies for the development of appropriate mathematical, algorithmic and software support.

**Keywords:** digital transformation, intelligent control systems, digital twins, machine vision, pyrometallurgical technologies, technological tasks, optimization, algorithm, software

**For citation:** Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Shnaider D.A., Krasnobaev A.V., Gurin I.A. Digital transformation of pyrometallurgical technologies: State, scientific problems and prospects of development. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 8, pp. 588–598. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-588-598>

## ВВЕДЕНИЕ

Многие ведущие металлургические компании России объявили о реализации концепции «Индустрия 4.0» и приняли стратегические программы цифровизации предприятия, предусматривающие создание цифровых двойников пирометаллургических технологий, широкое применение машинного зрения и искусственного интеллекта. Для реализации этой концепции на ряде предприятий разработаны программы развития, в которых важнейшей задачей цифровой трансформации пирометаллургических технологий является построение «Умного предприятия». Отметим, что превращение производственных предприятий в «умные» в Европе началось еще в 2011 г., где к настоящему времени уже накоплен значительный опыт. Такой подход позволит создать единую информационную основу для реализации комплекса мер по оптимизации и повышению эффективности работы как отдельных агрегатов, цехов, производств, так и предприятия в целом. Одно из направлений развития «Индустрии 4.0» – создание интеллектуальных систем для управления технологическим процессом отдельных агрегатов и их комплексов в режиме реального времени [1, 2]. При этом моделирование технологических процессов и систем управления в металлургии становится основополагающей частью этого процесса [3, 4].

## ТЕХНОЛОГИЯ МАШИННОГО (ТЕХНИЧЕСКОГО) ЗРЕНИЯ

В настоящее время все, что окружает человека, можно заменить технологией машинного зрения [5]. Основные решения применительно к металлургической промышленности сводятся к следующему: считывание маркировки на продукции и упаковке, прослеживание изделий в ходе производства, выявление аварийных выбросов веществ, классификация поверхностных дефектов изделий, контроль внешнего вида сырья и отгружаемой продукции, проверка наличия (отсутствия) объектов в зоне контроля, определение местоположения объектов, определение гранулометрического состава шихты [6]. В настоящее время эта технология широко применяется на ряде металлургических предприятий России.

На предприятии ПАО «Северсталь» приступили к собственной разработке систем видеосъемки поверхности металлопроката. Первый прототип решения подтвердил их эффективность (качество изображения, получаемое с оборудования, не уступает импортным аналогам). Это позволило существенно повысить качество контроля поверхности продукции [7]. На этом же предприятии для контроля положения горячекатаных рулонов на конвейерной линии и определения их опасного смещения (вплоть до падения) используется технология машинного зрения. Решение построено на базе двух моделей глубокого обучения (нейросетей), используется для работы видеопоток с имеющихся в производственном цеху комплексов видеонаблюдения [8].

Применяется машинное зрение в металлургическом и трубном производствах на ПАО «Челябинский трубопрокатный завод». Для этого используют камеры с высокой разрешающей способностью, на основе нейросетей ведется обучение системы, что позволяет вести диагностику различных видов дефектов труб [9].

На предприятиях АО «РУСАЛ» с использованием машинного зрения успешно эксплуатируется автоматическая система контроля герметизации электролизеров, основанная на анализе видеоизображения. Для обработки цифровых сигналов широко используются нейронные сети. Результат внедрения – существенное снижение вредных выбросов в атмосферу [10].

На ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» внедрена система распознавания газования на коксовых батареях с использованием машинного зрения, цель которой определить ненормативные выбросы газа через двери коксовых батарей. На видеокameraх системы установлены нейрочипы [11]. Реализуются проекты по распознаванию изображений с видеокamer, установленных на фурменных очагах доменной печи, а также по определению гранулометрического состава в потоке агломерата.

Одним из эффективных, интенсивно развивающихся в настоящее время методов контроля параметров высокотемпературных печей и агрегатов в металлургии является тепловизионный метод. Основным средством бесконтактного измерения в рамках рассматриваемого метода являются тепловизоры, которые способны по-

лучать тепловизионные изображения контролируемой поверхности в цифровом виде с последующей автоматизированной обработкой получаемой информации.

Для непрерывного определения температуры чугуна на доменной печи № 2 металлургического завода компании Liuzhou Steel Co. Ltd. (Китай) внедрен метод измерения температуры, основанный на интеграции инфракрасной термографии и математической модели снижения температуры на выпусках. Результаты промышленных экспериментов показывают, что предлагаемый метод позволяет одновременно измерять температуру расплавленного чугуна на скиммере и летке, а также обеспечивать надежные температурные данные для регулирования работы доменной печи [12, 13].

Однако формальное использование видеoinформации для сложных пирометаллургических процессов (без учета особенностей) технологии сложных, распределенных физико-химических процессов, даже при использовании самых современных методов обработки этой информации не всегда может дать объективную информацию о ходе технологического процесса.

В качестве примера рассмотрим две системы, используемые для контроля процессов в верхней и нижней частях доменной печи.

Для контроля распределения температуры на уровне засыпи доменных печей в настоящее время применяются тепловизионные изображения с последующей автоматизированной обработкой получаемой информации [14, 15]. Тепловизор является цифровым устройством, который в отличие от видеокамеры настроен на определенный диапазон (7,5 – 13,0 мкм) длин волн излучения, что соответствует диапазону измерения температур 50 – 1200 °С. По температурному полю над уровнем засыпи обычно оценивается степень неравномерности процессов в шахте и распаре доменной печи. В то же время анализ современных закономерностей теплообмена в доменных печах показывает, что в шахте доменной печи имеется горизонт, на котором наблюдается максимальная разность температур по радиусу печи. При современной технологии доменной плавки этот горизонт находится на глубине 3 – 4 м ниже уровня засыпи и перепад температур на этом горизонте в 2 – 3 раза выше, чем на уровне засыпи. Этот вывод подтверждается результатами исследований на действующих доменных печах [16]. Таким образом, по мере совершенствования технологии улучшения подготовки железорудного сырья температурное поле колошника теряет чувствительность к неравномерности, контроль температурного поля на уровне засыпи необходим, но недостаточен, а также не отражает реальной неравномерности распределения процессов в объеме печи.

Одной из главных трудностей при оценке теплового режима нижней части доменной печи является неполнота и недостаточная достоверность информации о текущем тепловом состоянии фурменных зон. Для контроля теплового состояния фурменных очагов до-

менных печей применяют информационные системы, включающие в себя непрерывную обработку видеопотока видеокамер, установленных на фурмах доменной печи [17], а также специальные термодатчики температуры торцевой стенки воздушных фурм. Это направление, безусловно, является перспективным. В связи с этим для оценки информативности этих способов разработана математическая модель системы воздушная фурма – фурменный очаг. В основу модели положены фундаментальные физико-химические закономерности формирования фурменных очагов, модели горения в фурменных очагах, в том числе с учетом использования пылеугольного топлива, природного газа и обогащения дутья кислородом. В результате определяют форму, геометрические размеры полости, поля температур и состав газовой фазы в пределах фурменного очага, а также температуру коксовой оболочки, ограничивающей полость. Предполагали, что непосредственно на верхнюю стенку фурмы поступает расплав (чугун, шлак), который разбрызгивается (диспергируется) высокоскоростным потоком дутья до мельчайших капель, заполняющими некоторый объем полости. В результате численного решения двумерной задачи определяют траекторию движения частицы расплава в объеме фурменного очага [18]. В дальнейшем с учетом данных о характере движения расплава, составе и температуре материалов и газа в объеме фурменного очага решали задачу оценки плотности теплового потока на торцевую стенку воздушной фурмы. В результате показано, что плотность теплового потока на торцевую стенку воздушной фурмы в большей степени определяется температурным полем коксовой оболочки фурменного очага и его газовой фазы и в меньшей степени зависит от изменения температуры и количества расплава. Таким образом, плотность теплового потока и температура зависит от теплового состояния коксовой оболочки и фурменного газа, а также от температуры и количества расплава в прифурменной области. Однако в последнем случае эта связь носит только вероятностный характер [16]. Перспективным направлением является интеграция этой системы технического зрения и математической модели процессов в фурменном очаге.

#### **ЦИФРОВЫЕ ПОМОЩНИКИ, ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ В ПИРОМЕТАЛЛУРГИИ**

Рассматриваемое направление связано, в первую очередь, с интеллектуализацией работы технологического персонала, решением задач моделирования, оптимизации технологических процессов, системами поддержки принятия решений по различным аспектам деятельности предприятия. При проектировании и реализации информационных систем речь должна идти о создании цифрового двойника объекта, а систему автоматизации следует рассматривать как часть единого информационного пространства предприятия.

Методологической основой создания моделей технологических процессов являются общая теория систем и системный анализ. При использовании этой методологии модель технологических процессов состоит из математических моделей не только отдельных элементов, но и взаимодействия между элементами и внешней средой, описываемых оператором взаимодействия (взаимосвязи). В идеале математическое описание каждого элемента должно включать уравнения, параметрами которых являются только физико-химические свойства веществ [3, 19 – 24]. Однако получить такое фундаментальное описание свойств всех элементов, их взаимосвязей при существующем уровне знаний и исследований некоторых явлений металлургических процессов не всегда представляется возможным.

В связи с этим требуется развитие других подходов для моделирования сложных технологических процессов в пирометаллургии. Оценивая в целом состояние реально функционирующих систем оптимального управления технологическими процессами и их комплексами в металлургии, следует констатировать, что существует внутренняя причина слабого внедрения систем такого класса, особенно сложных. Необходимо объединение современной теории оптимального управления с математическими моделями технологических процессов.

Проиллюстрируем эти положения на примере доменного процесса. В истории науки и техники отечественные ученые-доменщики оказались пионерами в области математического моделирования доменного процесса и создании систем автоматического управления технологическими процессами [25 – 32]. Современный уровень математического описания явлений в доменной печи не позволяет вскрыть все тонкости доменного процесса. Увеличение сложности модели, числа учитываемых факторов не всегда повышает надежность результатов моделирования. В силу изложенного прогноз показателей плавки и оценка хода основных процессов в печи могут эффективно выполняться на основе простых зависимостей для процессов тепло-, массообмена и газодинамики, совмещенных с балансовыми уравнениями, основанными на зональном рассмотрении процесса [25, 27, 30, 33]. Эти зависимости легко контролируются известными данными практики. При этом найдет применение натурная информация о работе доменной печи, появится возможность адаптации модели в темпе с процессом, а результаты моделирования можно будет легко контролировать по фактическим (натурным) данным. Использование отдельных статистических зависимостей (степени прямого восстановления железа от расхода восстановителей, степени использования оксида углерода от расхода топлива и др.) в балансовых методах по расчету расхода кокса положило начало развитию балансово-статистических методов моделирования доменного процесса. Для решения широкого класса задач в области анали-

за и прогнозирования доменной плавки, в частности, определения расхода кокса, производительности печи и других показателей доменной плавки эффективно используются материально-тепловые балансы и балансово-статистические методы, разработанные в Институте металлургии УрО РАН [34]. Аналогичные подходы используются и зарубежными учеными [35].

Перспективным для решения рассматриваемых задач оказался натурно-математический подход, разработанный в Сибирском государственном индустриальном университете [36]. В нем предусмотрено выделение двух моделей (базового состояния и прогнозирующей). Модель базового состояния по натурным данным о параметрах и показателях работы печи позволяет оценивать показатели состояния системы и использовать их для расчета коэффициентов настройки (адаптации) прогнозирующего блока модели. Прогнозирующая модель способна оценивать проектные показатели доменного процесса при изменении условий плавки относительно текущего состояния.

В основу модели теплового состояния современной доменной плавки Уральского федерального университета имени первого президента России Б.Н. Ельцина положены закономерности теплообмена [26, 37 – 39]. Последующее совершенствование модели доменного процесса на основе методологии системных исследований с учетом особенностей теплового, газодинамического, дутьевого и шлакового режимов, реально доступной информации о работе доменной печи, неравномерности распределения материалов и газов расширили возможности этой модели. Разработка программного обеспечения (ПО) с использованием современных технологий позволяет решить комплекс технологических задач по управлению доменной плавкой [40]. При разработке подсистем параметрической идентификации этих моделей широко использовали достижения других ведущих отечественных научных школ в области исследования и математического моделирования доменного процесса, а также хорошо проверенные на практике эмпирические уравнения.

Оригинальные положения интеллектуальной системы поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой разработаны в Институте черной металлургии НАН Украины [41]. Система основывается на диагностике состояния плавки с использованием критериев оценки теплового состояния и газодинамического режима доменной плавки, эффективности осевой коксовой отдушины, оценки формы, положения и толщины пластичной зоны в доменной печи и других критериев, основанных на технологических параметрах доменной плавки и информации систем контроля.

В последнее время разработаны и встроены в математическую модель доменного процесса блоки учета динамики процесса, а также соответствующие алгоритмическое и программное обеспечения времени [42 – 44]. Используются линеаризованная модель

доменного процесса и натурно-математический подход, что позволяет осуществлять настройку модели на условия функционирования объекта, учитывать при моделировании изменения состава и свойств железорудного сырья и кокса, дутьевых и режимных параметров доменной плавки. Исследованы переходные процессы доменной плавки по различным каналам управления. Это позволило по данным изменения входных параметров во времени в проектном периоде осуществить прогнозирование газодинамического и теплового режимов доменной плавки и в частности, содержания кремния в чугуна и состава конечного шлака в режиме реального времени [44].

Анализ современного состояния управления доменной плавкой позволяет сделать вывод о необходимости повышения эффективности доменной плавки на основе разработки динамической подсистемы поддержки принятия решений и создания совокупности алгоритмов модельной системы поддержки принятия решений, позволяющих количественно оценивать ход доменной плавки и распознавать виды и вероятность отклонения плавки от нормального режима.

В последние десятилетия активно разрабатываются новые подходы к оценке состояния и управлению плохо структурированными технологическими процессами: экспертные системы, системы распознавания образов, нейросетевые технологии [38, 45 – 55]. В связи с этим требуется развитие других подходов для моделирования сложных технологических процессов в пирометаллургии, основанных на применении методов машинного обучения (*Machine Learning*) и интеллектуального анализа больших данных (*Big Data*). Целесообразность их использования обусловлена следующим: исключительной сложностью явлений, свойственных доменному процессу; существенным развитием теории моделирования знаний; созданием и наполнением в реальном времени мощных баз данных технологических параметров [53, 56, 57]. Перспективным направлением следует считать интеграцию опыта инженерно-технологического персонала по управлению доменной плавкой и методов математического моделирования, в основу которых положены фундаментальные физические представления о процессах доменной плавки. Подсистема диагностики состояния и отклонений хода доменной плавки от нормального режима в режиме реального времени отслеживает показатели доменной плавки и на их основе в численном выражении указывает на возможные отклонения от нормального режима. В случае обнаружения таких отклонений подсистема определяет их вид и вероятность возникновения [47, 58].

Для контроля ряда технологических параметров широко используется типовая стандартная аппаратура отечественного и импортного производств. За последнее десятилетие в отечественном и зарубежном доменном производстве опробованы специальные средства измерения технологических параметров, не применявшие-

ся ранее. Однако вопросы обеспечения достоверности первичных данных в системах контроля распределения материалов и газов, непрерывного контроля состава и физических свойств загружаемых в печь шихтовых материалов, жидких продуктов плавки на выпусках, контроля положения и формы зоны вязкопластичного состояния материалов остаются открытыми. Недостаточный уровень контроля важнейших параметров доменной плавки снижает эффективность работы систем моделирования: разработка соответствующих датчиков и измерительных систем является первоочередной задачей. Как уже отмечали ранее, интеграция технологии машинного зрения и математических детерминированных моделей отдельных явлений доменной плавки, в основу которых положены фундаментальные физические закономерности, позволит в перспективе решить эти задачи.

Анализ современного уровня знаний основных закономерностей доменного процесса, имеющихся технических средств контроля, существенное расширение возможностей компьютерной техники и области применения методов математического моделирования показывают, что наиболее перспективными методами для диагностики состояния доменной печи являются наряду с инструментальными расчетно-инструментальные и компьютерные. Приведем два примера таких решений.

Существующие методы аналитического расчета тепловых потерь, имеющих место при выплавке чугуна в доменных печах, не отражают реальный процесс плавки. Анализ теплового баланса нижней ступени теплообмена позволяет определять тепловые потери в этой зоне печи по текущей информации о работе печи в конкретных сырьевых и режимных параметрах их работы. В настоящее время на основе теплового баланса нижней ступени теплообмена разрабатывается соответствующее алгоритмическое и программное обеспечения подсистемы контроля тепловых потерь [59].

Неравномерное распределения дутья по фурмам приводит к разной протяженности фурменных очагов, что вызывает различие в скорости схода шихты в отдельных секторах печи, формируется деформированный газовый поток по сечению. Для оценки неравномерности разработан алгоритм прогнозирования параметров фурменных очагов и управления распределением дутьевых параметров по окружности доменной печи. Он включает расчет теплосъемов с каждой из фурм, скорости истечения дутья из фурм, кинетической энергии дутья, полной механической энергии потока дутья, протяженности зоны циркуляции и окислительной зоны, теоретической температуры горения. Для стабилизации теплового состояния в фурменных очагах требуется корректировка расхода природного газа на каждую фурму для сохранения теоретических температур горения на заданном уровне. Для решения этой задачи разработан соответствующий алгоритм управления [60].

## **ЦИФРОВЫЕ ПОМОЩНИКИ, ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ КОМПЛЕКСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ В ПИРОМЕТАЛЛУРГИИ**

Создание цифровых помощников, цифровых двойников в пирометаллургии предусматривает существенное развитие алгоритмического и программного обеспечения для решения комплекса технологических задач не только на отдельных доменных печах, но и их комплексов на крупнейших металлургических предприятиях России. В целом анализ используемых математических моделей в практике технологии ведения доменной плавки показывает огромный разрыв между потенциальными возможностями средств автоматизации и возможностями используемого программного обеспечения. В ближайшие годы предстоит создание автоматизированной системы анализа и прогнозирования производственных ситуаций комплекса доменных печей и цеха в целом на основе разработки и применения новых методов и алгоритмов, позволяющих оценивать показатели работы доменных печей за любой требуемый период, а также прогнозирования работы доменных печей и цеха в целом при изменении технологических режимов. При постановке и решении требуются не только изучение характеристик, описывающих влияние изменения условий плавки на технико-экономические показатели работы отдельных печей, но и детальный анализ для математического описания внешних и внутренних ограничений. Осуществляется разработка на металлургических предприятиях сложной экономико-математической модели и программного обеспечения по оптимальному управлению технологии доменного цеха [61 – 65]. Такие системы предоставляют цифрового помощника для наблюдения за всем циклом производства чугуна и стали, а также поддержки принятия решений для достижения требуемых ключевых показателей эффективности (производительности, стоимости и качества продукции). Так, на ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» для решения этих задач разрабатывается автоматизированная система анализа и прогнозирования производственных ситуаций доменного цеха, в которой реализованы следующие подсистемы [66], осуществляющие:

- формирование и сопоставление отчетных показателей работы доменного цеха, расчета материальных балансов, балансов отдельных элементов, что позволит оперативно получать достоверную информацию для контроля и сравнения отчетных показателей работы доменных печей и цеха в целом в разные периоды;
- анализ и прогнозирование теплового режима доменной плавки, включая блоки расчета теплового баланса, комплекса показателей тепловых режимов, расхода кокса в базовом и проектном периодах работы доменных печей в случае планируемого изменения видов и свойств железорудного сырья, флюсов, дутьевых параметров, состава жидких продуктов плавки;

- анализ и прогнозирование шлакового режима доменной плавки, включая блоки расчета состава и свойств конечного шлака в базовом и проектном периодах работы доменных печей в случае планируемого изменения видов и свойств железорудного сырья, флюсов, дутьевых параметров, состава жидких продуктов плавки;
- анализ и прогнозирование газодинамического и дутьевого режимов доменной плавки в базовом и проектном периодах работы доменных печей при планируемых изменениях видов и свойств железорудного сырья, дутьевых и других параметров;
- выбор оптимального состава доменной шихты, что позволяет с учетом заданных технологических ограничений на шлаковый, газодинамический и тепловой режимы доменных печей определять необходимое соотношение шихтовых материалов, расход флюсов и состав агломерата для обеспечения его заданной основности;
- оптимальное распределение топливно-энергетических ресурсов в группе доменных печей в различных технологических ситуациях (сохранение или изменение общего расхода природного газа, кислорода, кокса для цеха в целом, а также изменение конъюнктуры рынка), отличающееся учетом технологических ограничений на работу отдельных печей.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННОЙ МЕТОДОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ И СОПРОВОЖДЕНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

При разработке ПО, предназначенного для работы инженерно-технологического персонала предприятий, необходимо учитывать следующие основные требования: функциональность, надежность функционирования, удобство использования и доступность, эффективность и переносимость. Такие требования обеспечивают оперативный доступ к информации при сохранении функциональных возможностей и надежности ПО и реализованы при создании веб-приложений.

С учетом требований к ПО необходимо использование современных подходов и средств при создании программного обеспечения. В их основе должны лежать методология функционального моделирования процессов и подсистем IDEF0 [67], инфологическое моделирование базы данных подсистем с использованием CASE-средств, а также проектирование расчетных блоков математических моделей на основе принципов структурного системного анализа и формализации процедурно-ориентированного подхода в виде диаграмм потоков данных DFD и спецификация к DFD-диаграммам [68].

К программному обеспечению для работы инженерно-технологического персонала на металлургических предприятиях относятся автоматизированные рабочие места, системы поддержки принятия решений, информационно-моделирующие системы, экспертные систе-

мы и др. Такие системы представляют собой веб-приложения [69], предусматривают многопользовательский доступ, а также разграничение прав пользователей. Составные элементы этих систем включают обработку технологической информации, поступающей с серверов управления базами данных (СУБД) и необходимость решения комплекса задач математического программирования, систем дифференциальных уравнений, задач математической физики и др. Такие задачи решаются на основе интеграции со специализированными математическими пакетами Microsoft Excel, MATLAB [70].

Для интеграции ПО с другими системами используется программный интерфейс *Application Program Interface (API)*. В рамках этого интерфейса взаимодействие между системами осуществляется по протоколу HTTP с использованием простого формата обмена данными JSON (*JavaScript Object Notation*).

## Выводы

Одним из основных направлений цифровой трансформации пирометаллургических технологий является

создание интеллектуальных систем управления технологическим процессом агрегатов и их комплексов в металлургии в режиме реального времени.

Анализ состояния вопроса по реально используемым математическим моделям в практике показывает в настоящее время огромный разрыв между потенциальными возможностями средств автоматизации и реальными возможностями используемого программного обеспечения.

Первостепенные задачи при цифровой трансформации пирометаллургических технологий сводятся к следующему: совершенствование существующих и разработка новых методов получения и оценки достоверности информации о состоянии технологического процесса; использование современных достижений в области математического моделирования, моделирования знаний, теории и практики современной металлургии, теории управления при разработке автоматизированных систем управления; разработка на основе современных принципов соответствующего математического, алгоритмического и программного обеспечения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Digital Twin // Gartner Glossary. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/digital-twin> (дата обращения 05.08.2021).
2. Цифровой двойник. Digital Twin of Organization, DTO // TADVISER. Государство. Бизнес. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой\\_двойник\\_\(Digital\\_Twin\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой_двойник_(Digital_Twin)) (дата обращения 05.08.2021).
3. Цымбал В.П. Математическое моделирование сложных систем в металлургии. Кемерово; М.: изд. объединение «Российские университеты»; Кузбассвузиздат – АСТШ, 2006. 431 с.
4. Дмитриев А.Н., Золотых М.О., Витькина Г.Ю. Совершенствование аглококсодомного производства с использованием цифровых технологий в рамках «Индустрии 4.0» // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 6. № 4. С. 339–345. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-4-339-343>
5. Stockman G., Shapiro L.G. Computer Vision. Prentice Hall PTR. Upper Saddle River, United States. 2001. 608 p.
6. Машинное (техническое) зрение. Металлургия // Mallenom Systems. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mallenom.ru/resheniya/mashinnoe-zrenie/po-otroslyam/metallurgii> (дата обращения 05.08.2021).
7. Северсталь осваивает изготовление систем видеоспецификации поверхности проката // ИИС «Металлоснабжение и сбыт». [Электронный ресурс]. URL: <https://www.metalinfo.ru/ru/news/118725> (дата обращения 05.08.2021).
8. Контроль положения горячекатаных рулонов на конвейере // Mallenom Systems. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mallenom.ru/vnedrenia/pmz/metallurgy2> (дата обращения 05.08.2021).
9. Группа ЧТПЗ внедрила новую технологию испытания труб на основе машинного зрения // Пресс-центр группы «ЧТПЗ». [Электронный ресурс]. URL: <https://chelpipe.ru/press-center/gruppa-cthpz-vnedrila-novuyu-tehnologiyu-ispytaniya-trub-na-osnove-mashinnogo-zreniya/> (дата обращения 05.08.2021).
10. Форум «Информационные технологии в металлургии и металлообработке» // Форум «ИТМЕТАЛЛ». [Электронный ресурс]. URL: <https://итметалл.рф/> (дата обращения 05.08.2021).
1. Digital Twin. *Gartner Glossary*. [Electronic resource]. Available at URL: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/digital-twin> (Accessed 05.08.2021).
2. Digital twin. Digital Twin of Organization, DTO. *TADVISER. State. Business*. [Electronic resource]. Available at URL: [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой\\_двойник\\_\(Digital\\_Twin\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Цифровой_двойник_(Digital_Twin)) (Accessed 05.08.2021).
3. Tsybmal V.P. *Mathematical Modeling of Complex Systems in Metallurgy*. Kemerovo; Moscow: Rossiiskie university; Kuzbassvuzizdat–ASTSh, 2006, 431 p. (In Russ.).
4. Dmitriev A.N., Zolotikh M.O., Vit'kina G.Yu. Improvement of sintering and blast-furnace production using digital technologies within the framework of Industry 4.0. *Chernaya metallurgiya. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2020, vol. 6, no. 4, pp. 339–345. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-4-339-343>
5. Stockman G., Shapiro L.G. *Computer Vision*. Prentice Hall PTR. Upper Saddle River, United States, 2001, 608 p.
6. Machine (technical) vision. Metallurgy. *Mallenom Systems*. [Electronic resource]. Available at URL: <https://www.mallenom.ru/resheniya/mashinnoe-zrenie/po-otroslyam/metallurgii> (Accessed 05.08.2021). (In Russ.).
7. Severstal is mastering manufacture of video inspection systems for rolled surfaces. *Metal Supply and Sales*. [Electronic resource]. Available at URL: <https://www.metalinfo.ru/ru/news/118725> (Accessed 05.08.2021). (In Russ.).
8. Control of position of hot-rolled coils on a conveyor. *Mallenom Systems*. [Electronic resource]. Available at URL: <https://www.mallenom.ru/vnedrenia/pmz/metallurgy2> (Accessed 05.08.2021). (In Russ.).
9. The ChelPipe Group has introduced a new technology for testing pipes based on machine vision. *Press Center of the ChelPipe Group*. [Electronic resource]. Available at URL: <https://chelpipe.ru/press-center/gruppa-cthpz-vnedrila-novuyu-tehnologiyu-ispytaniya-trub-na-osnove-mashinnogo-zreniya/> (Accessed 05.08.2021). (In Russ.).
10. Forum “Information Technologies in Metallurgy and Metalworking”. *ITMETALL Forum*. [Electronic resource]. Available at URL: <https://итметалл.рф/> (Accessed 10.01.2021). (In Russ.).

11. ТВ-ММК. Лидер цифровизации. Эфир: 17-12-2020 // YouTube Видеохостинг. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=7opclYs93dA> (дата обращения 10.01.2021).
12. Pan D., Jiang Z., Chen Z., Gui W., Xie Y., Yang C. Temperature measurement method for blast furnace molten iron based on infrared thermography and temperature reduction model // *Sensors*. 2018. Vol. 18. No. 11. Article 3792. <https://doi.org/10.3390/s18113792>
13. Usamentiaga R., Molleda J., Garcia D., Granda J.C., Rendueles J.L. Temperature measurement of molten pig iron with slag characterization and detection using infrared computer vision // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2012. Vol. 61. No. 5. P. 1149–1159. <https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2178675>
14. Shi L., Wen Y.-B., Zhao G.-S., Yu T. Recognition of blast furnace gas flow center distribution based on infrared image processing // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2016. Vol. 23. No. 3. P. 203–209. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(16\)30035-8](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(16)30035-8)
15. Zhu Q., Lü C.-L., Yin Y.-X., Chen X.-Z. Burden distribution calculation of bell-less top of blast furnace based on multi-radar data // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2013. Vol. 20. No. 6. P. 33–37. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60108-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60108-9)
16. Спири́н Н.А., Овчинников Ю.Н., Швы́дкий В.С., Яроше́нко Ю.Г. Теплообмен и повышение эффективности доменной плавки. Екатеринбург: изд. Уральского государственного технического университета, 1995. 243 с.
17. Ишметьев Е.Н., Салихов З.Г., Щетинин А.П., Будадин З.Г. Автоматическая диагностика эксплуатационного состояния опасных зон пирометаллургического агрегата // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2010. № 1. С. 58–61.
18. Spirin N.A., Shvydkii V.S., Ovchinnikov Yu.N., Lavrov V.V., Gusev A.A. Mathematical modeling of heat transfer in blast furnace raceway // *Steel in Translation*. 1998. Vol. 28. No. 4. P. 5–8.
19. Abhale P.B., Viswanathan N.N., Saxen H. Numerical modelling of blast furnace – Evolution and recent trends // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*. 2020. Vol. 129. No. 2. P. 166–83. <https://doi.org/10.1080/25726641.2020.1733357>
20. Bambauer F., Wirtz S., Scherer V., Bartusch H. Transient DEM-CFD simulation of solid and fluid flow in a three dimensional blast furnace model // *Powder Technology*. 2018. Vol. 334. P. 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.04.062>
21. Fu D., Chen Y., Rahman M.T., Zhou C.Q., D’Alessio J., Ferron K.J. Validation of the numerical model for blast furnace shaft process // *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2012. Article 92531. P. 417–427.
22. De Castro J.A., Nogami H., Yagi J.-I. Three-dimensional multiphase mathematical modeling of the blast furnace based on the multifluid model // *ISIJ International*. 2002. Vol. 42. No. 1. P. 44–52. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.44>
23. Peacey J.G., Davenport W.G. *The Iron Blast Furnace: theory and practice*. Elsevier Science, 2013. 266 p.
24. Baniyadi M., Peters B. Preliminary investigation on the capability of eXtended discrete element method for treating the dripping zone of a blast furnace // *ISIJ International*. 2018. Vol. 58. No 1. P. 25–34. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-344>
25. Рамм А.Н. Современный доменный процесс. М.: Металлургия, 1980. 304 с.
26. Теплотехника доменного процесса / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий. М.: Металлургия, 1978. 248 с.
27. Товаровский И.Г. Доменная плавка. Днепропетровск: Пороги, 2009. 768 с.
28. Большаков В.И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. Киев: Наукова думка, 2007. 411 с.
29. Андронов В.Н. Экстракция черных металлов из природного и техногенного сырья. Доменный процесс. Донецк: Норд-Пресс, 2009. 377 с.
30. Бабарькин Н.Н. Теория и технология доменного процесса. Магнитогорск: МГТУ, 2009. 257 с.
11. TV-MMK. Leader of digitalization. Air: 17-12-2020: YouTube Video hosting. [Electronic resource]. Available at URL: <https://www.youtube.com/watch?v=7opclYs93dA> (Accessed 05.08.2021). (In Russ.).
12. Pan D., Jiang Z., Chen Z., Gui W., Xie Y., Yang C. Temperature measurement method for blast furnace molten iron based on infrared thermography and temperature reduction model. *Sensors*. 2018, vol. 18, no. 11, article 3792. <https://doi.org/10.3390/s18113792>
13. Usamentiaga R., Molleda J., Garcia D., Granda J.C., Rendueles J.L. Temperature measurement of molten pig iron with slag characterization and detection using infrared computer vision. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2012, vol. 61, no. 5, pp. 1149–1159. <https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2178675>
14. Shi L., Wen Y.-B., Zhao G.-S., Yu T. Recognition of blast furnace gas flow center distribution based on infrared image processing. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2016, vol. 23, no. 3, pp. 203–209. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(16\)30035-8](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(16)30035-8)
15. Zhu Q., Lü C.-L., Yin Y.-X., Chen X.-Z. Burden distribution calculation of bell-less top of blast furnace based on multi-radar data. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2013, vol. 20, no. 6, pp. 33–37. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60108-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60108-9)
16. Spirin N.A., Ovchinnikov Yu.N., Shvydkii V.S., Yaroshenko Yu.G. *Heat Transfer and Improving the Efficiency of Blast-Furnace Smelting*. Yekaterinburg: izd. Ural’skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 1995, 243 p. (In Russ.).
17. Ishmetyev E.N., Salikhov Z.G., Shchetinin A.P., Budadin Z.G. Automatic diagnostics of the operational state of pyrometallurgical unit hazardous zones. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2010, no. 1, pp. 58–61.
18. Spirin N.A., Shvydkii V.S., Ovchinnikov Yu.N., Lavrov V.V., Gusev A.A. Mathematical modeling of heat transfer in blast furnace raceway. *Steel in Translation*. 1998, vol. 28, no. 4, pp. 5–8.
19. Abhale P.B., Viswanathan N.N., Saxen H. Numerical modelling of blast furnace – Evolution and recent trends. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*. 2020, vol. 129, no. 2, pp. 166–83. <https://doi.org/10.1080/25726641.2020.1733357>
20. Bambauer F., Wirtz S., Scherer V., Bartusch H. Transient DEM-CFD simulation of solid and fluid flow in a three dimensional blast furnace model. *Powder Technology*. 2018, vol. 334, pp. 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.04.062>
21. Fu D., Chen Y., Rahman M.T., Zhou C.Q., D’Alessio J., Ferron K.J. Validation of the numerical model for blast furnace shaft process. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2012, article 92531, pp. 417–427.
22. De Castro J.A., Nogami H., Yagi J.-I. Three-dimensional multiphase mathematical modeling of the blast furnace based on the multifluid model. *ISIJ International*. 2002, vol. 42, no. 1, pp. 44–52. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.44>
23. Peacey J.G., Davenport W.G. *The Iron Blast Furnace: Theory and Practice*. Elsevier Science, 2013, 266 p.
24. Baniyadi M., Peters B. Preliminary investigation on the capability of eXtended discrete element method for treating the dripping zone of a blast furnace. *ISIJ International*. 2018, vol. 58, no 1, pp. 25–34. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-344>
25. Ramm A.N. *Modern Blast Furnace Process*. Moscow: Metallurgiya, 1980, 304 p. (In Russ.).
26. Kitaev B.I., Yaroshenko Yu.G., Sukhanov E.L., Ovchinnikov Yu.N., Shvydkii V.S. *Heat Engineering of Blast Furnace*. Moscow: Metallurgiya, 1978, 248 p. (In Russ.).
27. Tovarovskii I.G. *Blast Furnace Smelting*. Dnepropetrovsk: Porogi, 2009, 768 p. (In Russ.).
28. Bol’shakov V.I. *Technology of High-Efficiency Energy-Saving Blast Furnace Smelting*. Kiev: Naukova dumka, 2007, 411 p. (In Russ.).
29. Andronov V.N. *Extraction of Ferrous Metals from Natural and Technogenic Raw Materials. Blast Furnace Process*. Donetsk: Nord-Press, 2009, 377 p. (In Russ.).
30. Babarykin N.N. *Theory and Technology of Blast Furnace Process*. Magnitogorsk: MSTU, 2009, 257 p. (In Russ.).

31. Дмитриев А.Н. Математическое моделирование доменного процесса. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 162 с.
32. Доброскок В.А., Кузнецов Н.А., Туманов А.И. Математические модели процессов газодинамики и восстановления в доменной печи // Известия вузов. Черная металлургия. 1985. № 3. С. 145, 146.
33. Курунов И.Ф., Ященко С.Б. Методика расчета технико-экономических показателей доменной плавки // Научные труды Московского института стали и сплавов. 1983. № 152. С. 57–64.
34. Ченцов А.В., Чесноков Ю.А., Шаврин С.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 176 с.
35. Ueda S., Natsui S., Nogami H., Yagi J.-I., Ariyama T. Recent progress and future perspective on mathematical modeling of blast furnace // ISIJ International. 2010. Vol. 50. No. 7. P. 914–923. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.914>
36. Теория и практика прогнозирования в системах управления / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, Л.П. Мышляев, А.С. Рыков, В.Ф. Евтушенко. М.: Российские университеты, 2008. 487 с.
37. Загайнов С.А., Онорин О.П., Гилева Л.Ю., Волков Д.Н., Тлеугобулов Б.С. Разработка и внедрение математического и программного обеспечения для гибких технологических режимов работы доменных печей // Сталь. 2000. № 9. С. 12–15.
38. Информационные системы в металлургии / Н.А. Спири́н, Ю.В. Ипатов, В.И. Лобанов, В.А. Краснобаев, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, В.С. Швыдкий, С.А. Загайнов, О.П. Онорин. Екатеринбург: изд. УГТУ–УПИ, 2001. 617 с.
39. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спири́н, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, Л.Ю. Гилева, А.В. Краснобаев, В.С. Швыдкий, О.П. Онорин, К.А. Щипанов, А.А. Бурькин. Екатеринбург: УрФУ, 2014. 558 с.
40. Pavlov A.V., Polinov A.A., Spirin N.A., Onorin O.P., Lavrov V.V. Use of model systems for solving new technological problems in blast-furnace production // Metallurgist. 2017. Vol. 61. No. 5-6. P. 448–454. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0516-7>
41. Муравьева И.Г., Тогобитская Д.Н., Нестеров А.С., Иванча Н.Г. Новый уровень управления доменной плавкой в разработках ИЧМ // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 11. С. 1231–1236. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-11-1231-1236>
42. Hashimoto Y., Kitamura Y., Ohashi T., Sawa Y., Kano M. Transient model-based operation guidance on blast furnace // Control Engineering Practice. 2019. Vol. 82. P. 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.10.009>
43. Saxen H., Gao C., Gao Z. Data-driven time discrete models for dynamic prediction of the hot metal silicon content in the blast furnace – A review // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2013. Vol. 9. No. 4. Article 6341833. P. 2213–2225. <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2226897>
44. Spirin N.A., Polinov A.A., Gurin I.A., Beginyuk V.A., Pishnograev S.N., Istomin A.S. Information system for real-time prediction of the silicon content of iron in a blast furnace // Metallurgist. 2020. Vol. 63. No. 9-10. P. 898–905. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00907-y>
45. Френкель М.М., Федулов Ю.В., Белова О.А. и др. Экспертная система управления ходом доменной плавки // Сталь. 1992. № 7. С. 15–18.
46. Соловьев В.И., Павлова Е.А., Краснобаев В.А. Интеллектуальная автоматизированная система управления металлургическими агрегатами // Черные металлы. 2004. № 7-8. С. 26–29.
47. Spirin N.A., Onorin O.P., Istomin A.S., Lavrov V.V., Gurin I.A. Information modelling system for diagnostics of different types of blast-furnace smelting deviations from normal conditions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 411. No. 1. Article 012072. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012072>
48. Ge A.X. A Neural Network Approach to the Modeling of Blast Furnace: Thesis (M. Eng.). Massachusetts Institute of Technology, 1999. 69 p.
31. Dmitriev A.N. *Mathematical Modeling of Blast Furnace Process*. Yekaterinburg: UB RAS, 2011, 162 p. (In Russ.).
32. Dobroskok V.A., Kuznetsov N.A., Tumanov A.I. Mathematical models of gas dynamics and reduction processes in a blast furnace. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1985, no. 3, pp. 145, 146. (In Russ.).
33. Kurunov I.F., Yashchenko S.B. Methodology for calculating the technical and economic indicators of blast-furnace smelting. *Nauchnye trudy Moskovskogo instituta stali i splavov*. 1983, no. 152, pp. 57–64. (In Russ.).
34. Chentsov A.V., Chesnokov Yu.A., Shavrin S.V. *Balance Logical-Statistical Model of Blast-Furnace Process*. Yekaterinburg: UB RAS, 2003, 176 p. (In Russ.).
35. Ueda S., Natsui S., Nogami H., Yagi J.-I., Ariyama T. Recent progress and future perspective on mathematical modeling of blast furnace. *ISIJ International*. 2010, vol. 50, no. 7, pp. 914–923. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.914>
36. Emel'yanov S.V., Korovin S.K., Myshlyayev L.P., Rykov A.S., Evtushenko V.F. *Theory and Practice of Prediction in Control Systems*. Moscow: Rossiiskie universitety, 2008, 487 p. (In Russ.).
37. Zagainov S.A., Onorin O.P., Gileva L.Yu., Volkov D.N., Tleugobulov B.S. Development and implementation of mathematical and software support for flexible technological modes of blast furnace operation. *Stal'*. 2000, no. 9, pp. 12–15. (In Russ.).
38. Spirin N.A., Ipatov Yu.V., Lobanov V.I., Krasnobayev V.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Shvydkii V.S., Zagainov S.A., Onorin O.P. *Information Systems in Metallurgy*. Yekaterinburg: izd. USTU–UPI, 2001, 617 p. (In Russ.).
39. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Gileva L.Yu., Krasnobayev A.V., Shvydkii V.S., Onorin O.P., Shchipanov K.A., Burykin A.A. *Mathematical Modeling of Metallurgical Processes in APCs*. Yekaterinburg: UrFU, 2014, 558 p. (In Russ.).
40. Pavlov A.V., Polinov A.A., Spirin N.A., Onorin O.P., Lavrov V.V. Use of model systems for solving new technological problems in blast-furnace production. *Metallurgist*. 2017, vol. 61, no. 5-6, pp. 448–454. <https://doi.org/10.1007/s11015-017-0516-7>
41. Murav'eva I.G., Togobitskaya D.N., Nesterov A.S., Ivancha N.G. A new level of blast furnace smelting control in FMI developments. *Chernaya metallurgiya. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2019, vol. 75, no. 11, pp. 1231–1236. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2019-11-1231-1236>
42. Hashimoto Y., Kitamura Y., Ohashi T., Sawa Y., Kano M. Transient model-based operation guidance on blast furnace. *Control Engineering Practice*. 2019, vol. 82, pp. 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2018.10.009>
43. Saxen H., Gao C., Gao Z. Data-driven time discrete models for dynamic prediction of the hot metal silicon content in the blast furnace – A review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2013, vol. 9, no. 4, article 6341833, pp. 2213–2225. <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2226897>
44. Spirin N.A., Polinov A.A., Gurin I.A., Beginyuk V.A., Pishnograev S.N., Istomin A.S. Information system for real-time prediction of the silicon content of iron in a blast furnace. *Metallurgist*. 2020, vol. 63, no. 9-10, pp. 898–905. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00907-y>
45. Frenkel' M.M., Fedulov Yu.V., Belova O.A., etc. Expert control system for blast furnace smelting. *Stal'*. 1992, no. 7, pp. 15–18. (In Russ.).
46. Solov'ev V.I., Pavlova E.A., Krasnobayev V.A. Intelligent automated control system for metallurgical units. *Chernye metally*. 2004, no. 7-8, pp. 26–29.
47. Spirin N.A., Onorin O.P., Istomin A.S., Lavrov V.V., Gurin I.A. Information modelling system for diagnostics of different types of blast-furnace smelting deviations from normal conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 411, no. 1, article 012072. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012072>
48. Ge A.X. *A Neural Network Approach to the Modeling of Blast Furnace: Thesis (M. Eng.)*. Massachusetts Institute of Technology, 1999, 69 p.

49. Chen J. Predictive system for blast furnaces by integrating a neural network with qualitative analysis // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2001. Vol. 14. No. 1. P. 77–85. [https://doi.org/10.1016/S0952-1976\(00\)00062-2](https://doi.org/10.1016/S0952-1976(00)00062-2)
50. Jimenez J., Mochon J., De Ayala J.S., Obeso F. Blast furnace hot metal temperature prediction through neural networks-based models // *ISIJ International*. 2004. Vol. 44. No. 3. P. 573–580. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.573>
51. Сибатагуллин С.К., Харченко А.С., Девятченко Л.Д. Приложение марковских цепей к анализу эффективности работы доменной печи // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018. Т. 61. № 8. С. 649–656. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-8-649-656>
52. Кулаков С.М., Трофимов В.Б. Интеллектуальные системы управления технологическими объектами: теория и практика. Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2009. 223 с.
53. Xie H., Wang J., Wang G., Xiao-dong Sun X.-D. Application of big data in optimization of blast furnace operation // *AISTech 2019 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*. 2019. Vol. 2019–May. P. 587–591. <https://doi.org/10.33313/377/062>
54. Zhang Y., Sukhram M., Cameron I., Bolen J., Roza A. Industrial perspective of digital twin development and applications for iron and steel processes // *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2020. Vol. 3. P. 1975–1984. <https://doi.org/10.33313/380/213>
55. Cameron I., Sukhram M., Lefebvre K., Davenport W. Blast furnace ironmaking: analysis, control and optimization. 1<sup>st</sup> ed. Elsevier Science. 2019. 828 p. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-00007-1>
56. Kazarinov L.S., Barbasova T.A. Elliptic component analysis. In: 2<sup>nd</sup> International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. ICIEAM. 2016. Article 7910936. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7910936>
57. Shnyder D.A., Kazarinov L.S., Barbasova T.A., Lipatnikov A.V. Data mining and model-predictive approach for blast furnace thermal control // *Intelligent Systems Conference. IntelliSys*. 2017. Vol. 2018 – January. Article 8324364. P. 653–660. <https://doi.org/10.1109/IntelliSys.2017.8324364>
58. Kamo K., Hamamoto K., Maeda T., Narazaki H., Yakeya M., Tanaka Y. Method for predicting gas channeling in blast furnace // *R and D: Research and Development Kobe Steel Engineering Reports*. 2018. Vol. 68. No. 2. P. 7–11.
59. Onorin O.P., Polinov A.A., Pavlov A.V., Spirin N.A., Gurin I.A. About a possibility of using blast furnace heat balance to control heat losses // *Metallurgist*. 2018. Vol. 62. No. 3-4. P. 218–224. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0648-4>
60. Polinov A.A., Pavlov A.V., Onorin O.P., Spirin N.A., Gurin I.A. Blast distribution over the air tuyeres of a blast furnace // *Metallurgist*. 2018. Vol. 62. No. 5-6. P. 418–424. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0676-0>
61. Kuang S., Li Z., Yu A. Review on modeling and simulation of blast furnace // *Steel Research International*. 2018. Vol. 89. No 1. Article 1700071. <https://doi.org/10.1002/srin.201700071>
62. Pettersson F., Saxen H. Model for economic optimization of iron production in the blast furnace // *ISIJ International*. 2006. Vol. 46. No. 9. P. 1297–1305. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.1297>
63. Gordon Y., Izumskiy N., Matveienko G., Chaika O., Lebid V., Vyshinskaya O. Diagnostics, optimization and mathematical models of coke-sinter-hot metal production process // *AISTech 2019 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*. 2019. Vol. 2019 – May. P. 479–484. <https://doi.org/10.33313/377/050>
64. Bettinger D., Fritschek H., Schaler M., Kronberger T., Wollhofen R. A holistic approach to ironmaking digitalization // *AISTech 2019 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*. 2019. Vol. 2019 – May. P. 577–585. <https://doi.org/10.33313/377/061>
65. Alter M.A. Optimization of parameters of blast furnace smelting under conditions of plant operation with limited supply of coke, natural gas or iron-bearing materials // *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2020. Vol. 1. P. 302–309. <https://doi.org/10.33313/380/035>
49. Chen J. Predictive system for blast furnaces by integrating a neural network with qualitative analysis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2001, vol. 14, no. 1, pp. 77–85. [https://doi.org/10.1016/S0952-1976\(00\)00062-2](https://doi.org/10.1016/S0952-1976(00)00062-2)
50. Jimenez J., Mochon J., De Ayala J.S., Obeso F. Blast furnace hot metal temperature prediction through neural networks-based models. *ISIJ International*. 2004, vol. 44, no. 3, pp. 573–580. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.573>
51. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Devyatchenko L.D. Application of Markov chains to the analysis of blast furnace operation efficiency. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 8, pp. 649–656. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-8-649-656>
52. Kulakov S.M., Trofimov V.B. *Intelligent Control Systems for Technological Objects: Theory and Practice*. Novokuznetsk: SibSIU, 2009, 223 p. (In Russ.).
53. Xie H., Wang J., Wang G., Xiao-dong Sun X.-D. Application of big data in optimization of blast furnace operation. *AISTech 2019 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*. 2019, vol. 2019–May, pp. 587–591. <https://doi.org/10.33313/377/062>
54. Zhang Y., Sukhram M., Cameron I., Bolen J., Roza A. Industrial perspective of digital twin development and applications for iron and steel processes. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2020, vol. 3, pp. 1975–1984. <https://doi.org/10.33313/380/213>
55. Cameron I., Sukhram M., Lefebvre K., Davenport W. *Blast Furnace Ironmaking: Analysis, Control and Optimization*. 1<sup>st</sup> ed. Elsevier Science, 2019, 828 p. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-00007-1>
56. Kazarinov L.S., Barbasova T.A. Elliptic component analysis. In: 2<sup>nd</sup> International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. ICIEAM. 2016, article 7910936. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7910936>
57. Shnyder D.A., Kazarinov L.S., Barbasova T.A., Lipatnikov A.V. Data mining and model-predictive approach for blast furnace thermal control. *Intelligent Systems Conference. IntelliSys*. 2017, vol. 2018 – January, article 8324364, pp. 653–660. <https://doi.org/10.1109/IntelliSys.2017.8324364>
58. Kamo K., Hamamoto K., Maeda T., Narazaki H., Yakeya M., Tanaka Y. Method for predicting gas channeling in blast furnace. *R and D: Research and Development Kobe Steel Engineering Reports*. 2018, vol. 68, no. 2, pp. 7–11.
59. Onorin O.P., Polinov A.A., Pavlov A.V., Spirin N.A., Gurin I.A. About a possibility of using blast furnace heat balance to control heat losses. *Metallurgist*. 2018, vol. 62, no. 3-4, pp. 218–224. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0648-4>
60. Polinov A.A., Pavlov A.V., Onorin O.P., Spirin N.A., Gurin I.A. Blast distribution over the air tuyeres of a blast furnace. *Metallurgist*. 2018, vol. 62, no. 5-6, pp. 418–424. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0676-0>
61. Kuang S., Li Z., Yu A. Review on modeling and simulation of blast furnace. *Steel Research International*. 2018, vol. 89, no. 1, article 1700071. <https://doi.org/10.1002/srin.201700071>
62. Pettersson F., Saxen H. Model for economic optimization of iron production in the blast furnace. *ISIJ International*. 2006, vol. 46, no. 9, pp. 1297–1305. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.1297>
63. Gordon Y., Izumskiy N., Matveienko G., Chaika O., Lebid V., Vyshinskaya O. Diagnostics, optimization and mathematical models of coke-sinter-hot metal production process. *AISTech 2019 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*. 2019, vol. 2019 – May, pp. 479–484. <https://doi.org/10.33313/377/050>
64. Bettinger D., Fritschek H., Schaler M., Kronberger T., Wollhofen R. A holistic approach to ironmaking digitalization. *AISTech 2019 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*. 2019, vol. 2019 – May, pp. 577–585. <https://doi.org/10.33313/377/061>
65. Alter M.A. Optimization of parameters of blast furnace smelting under conditions of plant operation with limited supply of coke, natural gas or iron-bearing materials. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2020, vol. 1, pp. 302–309. <https://doi.org/10.33313/380/035>

66. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / Н.А. Спири́н, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, А.В. Краснобаев, О.П. Онорин, И.Е. Косаченко. Екатеринбург: УрФУ, 2011. 462 с.
67. Waissi G.R., Demir M., Humble J.E., Lev B. Automation of strategy using IDEF0 – A proof of concept // *Operations Research Perspectives*. 2015. Vol. 2. P. 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2015.05.001>
68. Hou C., Wang J., Chen C. Using hierarchical scenarios to predict the reliability of component-based software // *IEICE Transactions on Information and Systems*. 2018. Vol. E101D. No. 2. P. 405–414. <https://doi.org/10.1587/transinf.2017EDP7127>
69. Chen B., Hsu H.-P., Huang Y.-L. Bringing desktop applications to the web // *IT Professional*. 2016. Vol. 18. No. 1. Article 7389272. P. 34–40. <https://doi.org/10.1109/MITP.2016.15>
70. Phan J. *MATLAB – C# for Engineers*. CreateSpace Independent Publishing Platform. 2010. 322 p.
66. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Krasnobaev A.V., Onorin O.P., Kosachenko I.E. *Model Decision Support Systems in APCs of Blast Furnace Smelting*. Yekaterinburg: UrFU, 2011, 462 p. (In Russ.).
67. Waissi G.R., Demir M., Humble J.E., Lev B. Automation of strategy using IDEF0 – A proof of concept. *Operations Research Perspectives*. 2015, vol. 2, pp. 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2015.05.001>
68. Hou C., Wang J., Chen C. Using hierarchical scenarios to predict the reliability of component-based software. *IEICE Transactions on Information and Systems*. 2018, vol. E101D, no. 2, pp. 405–414. <https://doi.org/10.1587/transinf.2017EDP7127>
69. Chen B., Hsu H.-P., Huang Y.-L. Bringing desktop applications to the web. *IT Professional*. 2016, vol. 18, no. 1, article 7389272, pp. 34–40. <https://doi.org/10.1109/MITP.2016.15>
70. Phan J. *MATLAB – C# for Engineers*. CreateSpace Independent Publishing Platform. 2010, 322 p.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Николай Александрович Спири́н**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теплофизика и информатика в металлургии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

**ORCID:** 0000-0001-6582-3428

**E-mail:** n.a.spirin@urfu.ru

**Владислав Васильевич Лавров**, д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

**ORCID:** 0000-0002-6953-5519

**E-mail:** v.v.lavrov@urfu.ru

**Валерий Юрьевич Рыболовлев**, к.т.н., начальник проектного офиса, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

**ORCID:** 0000-0001-9153-227X

**E-mail:** rybolovlev.vy@mmk.ru

**Дмитрий Александрович Шнайдер**, д.т.н., начальник Центра математического моделирования и системно-аналитических исследований, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

**ORCID:** 0000-0001-7275-6569

**E-mail:** Shnyder.DA@mmk.ru

**Алексей Викторович Краснобаев**, к.т.н., менеджер проектного офиса, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

**ORCID:** 0000-0003-1364-3243

**E-mail:** krasnobaev.av@mmk.ru

**Иван Александрович Гури́н**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

**ORCID:** 0000-0002-4989-7029

**E-mail:** ivan.gurin@urfu.ru

**Nikolai A. Spirin**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

**ORCID:** 0000-0001-6582-3428

**E-mail:** n.a.spirin@urfu.ru

**Vladislav V. Lavrov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

**ORCID:** 0000-0002-6953-5519

**E-mail:** v.v.lavrov@urfu.ru

**Valerii Yu. Rybolovlev**, Cand. Sci. (Eng.), Chief of the Design Office, PJSC “Magnitogorsk Metallurgical Plant”

**ORCID:** 0000-0001-9153-227X

**E-mail:** rybolovlev.vy@mmk.ru

**Dmitrii A. Schneider**, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Center of Mathematical Modeling and System Analytical Research, PJSC “Magnitogorsk Metallurgical Plant”

**ORCID:** 0000-0001-7275-6569

**E-mail:** Shnyder.DA@mmk.ru

**Alexei V. Krasnobaev**, Cand. Sci. (Eng.), Manager of the Design Office, PJSC “Magnitogorsk Metallurgical Plant”

**ORCID:** 0000-0003-1364-3243

**E-mail:** krasnobaev.av@mmk.ru

**Ivan A. Gurin**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

**ORCID:** 0000-0002-4989-7029

**E-mail:** ivan.gurin@urfu.ru

Поступила в редакцию 03.03.2021

После доработки 17.03.2021

Принята к публикации 19.04.2021

Received 03.03.2021

Revised 17.03.2021

Accepted 19.04.2021



Оригинальная статья

УДК 536.425:539.25

DOI 10.17073/0368-0797-2021-8-599-605



## ФОРМИРОВАНИЕ УЛУЧШЕННЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА Cantor

В. Е. Громов<sup>1</sup>, Ю. А. Рубанникова<sup>1</sup>, С. В. Коновалов<sup>1,2</sup>,  
К. А. Осинцев<sup>1,2</sup>, С. В. Воробьев<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34)

**Аннотация.** Выполнен краткий обзор публикаций последних лет отечественных и зарубежных исследователей по изучению возможностей улучшения механических свойств пятикомпонентного высокоэнтропийного сплава (ВЭС) Cantor различного фазового состава в широком диапазоне температур. Этот один из первых, созданных эквимольярных ВЭС с ГЦК структурой несмотря на высокую ударную вязкость и повышенное сопротивление ползучести нуждается в улучшении механических свойств ввиду возможных областей использования. Отмечено, что создание бимодального распределения зерен по размерам путем интенсивной пластической деформации кручением при высоком давлении 7,8 ГПа литого сплава и последующего кратковременного отжига при 873 и 973 К способно значительно изменить прочностные и пластические свойства. Для полученного методом магнетронного распыления ВЭС и последующего отжига при 573 К достигался наноразмерный масштаб зерен, окруженных аморфной оболочкой. В таком двухфазном сплаве нанотвердость составляла 9,44 ГПа, а модуль упругости 183 ГПа. Используя эффект пластичности, индуцированной фазовым превращением в сплаве  $(\text{CrMnFeCoNi})_{50}\text{Fe}_{50}$ , полученном методом лазерной аддитивной технологии, достигался предел прочности 415 – 470 МПа при высоком уровне пластичности до 77 %. Это обеспечивалось бездиффузионным ГЦК → ОЦК превращением. Показано, что различие в виде механизмов пластической деформации литого сплава при 77 и 293 К (дислокационное скольжение и двойникование) определяет комбинацию повышенных свойств прочность – пластичность. Предварительно продеформированные при 77 К образцы для формирования нанодвойников при последующем нагружении при 293 К проявляют повышенную прочность и пластичность по сравнению с недеформированными. Для ВЭС, полученного по лазерной аддитивной технологии, также справедлив этот путь повышения свойств. Отмечен путь улучшения механических свойств за счет электронно-пучковой обработки. Обращено внимание на необходимость учета роли энтропии, искажений кристаллической решетки, ближнего порядка, слабой диффузии и «коктейль» эффекта в анализе механических свойств.

**Ключевые слова:** сплав Cantor, механические свойства, механизмы деформации, структура, фазовый состав, распределение зерен, двойники

**Финансирование:** Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-19-00452).

**Для цитирования:** Громов В.Е., Рубанникова Ю.А., Коновалов С.В., Осинцев К.А., Воробьев С.В. Формирование улучшенных механических свойств высокоэнтропийного сплава Cantor // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 8. С. 599–605.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-599-605>

Original article

## GENERATION OF INCREASED MECHANICAL PROPERTIES OF CANTOR HIGH-ENTROPY ALLOY

V. E. Gromov<sup>1</sup>, Yu. A. Rubannikova<sup>1</sup>, S. V. Konovalov<sup>1,2</sup>,  
K. A. Osintsev<sup>1,2</sup>, S. V. Vorob'ev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

<sup>2</sup> Samara National Research University (34 Moskovskoe Route, Samara 443086, Russian Federation)

**Abstract.** The article considers a brief review of the last years of Russian and foreign research on the possibilities of improving mechanical properties of the Cantor quinary high-entropy alloy (HEA) with different phase composition in wide temperature range. The alloy, one of the first created equimolar HEAs with FCC structure, needs mechanical properties improvement in accordance with possible fields of application in spite of its high impact toughness and increased creep resistance. It has been noted that bimodal distribution of the grains by sizes under severe plastic torsional strain at high pressure of 7.8 GPa of cast alloy and subsequent short-time annealing at 873 and 973 K can change strength and plastic properties. Nanodimensional scale of the grains surrounded by amorphous envelope has been obtained for HEA produced by the method of magnetron sputtering and subsequent annealing at 573 K. In such a two-phase alloy nanohardness amounted to 9.44 GPa and elasticity modulus – to 183 GPa. Using plasticity effect induced by phase transformation in  $(\text{CrMnFeCoNi})_{50}\text{Fe}_{50}$  alloy obtained by the method of laser additive technology

the ultimate strength of 415 – 470 MPa has been reached at high level of plasticity up to 77 %. It has been ensured by FCC → BCC diffusionless transformation. It is shown that difference in mechanisms of plastic strain of cast alloy at 77 K and 293 K (dislocation glide and twinning) determines a combination of increased “strength-plasticity” properties. Samples for generation of twins prestrained at 77 K exhibit increased strength and plasticity under subsequent loading at 293 K in comparison with the unstrained ones. For HEA obtained by laser additive technology this way of increasing properties is also true. The way of improving mechanical properties at the expense of electron beam processing is noted. The attention is paid to the necessity of taking into account the role of entropy, crystal lattice distortions, short-range order, weak diffusion and “cocktail” effect in the analysis of mechanical properties.

**Keywords:** Cantor alloy, mechanical properties, mechanisms of strain, structure, phase composition, grain distribution, twins

**Funding:** The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation (project No. 20-19-00452).

**For citation:** Gromov V.E., Rubannikova Yu.A., Konovalov S.V., Osintsev K.A., Vorob'ev S.V. Generation of increased mechanical properties of Cantor high-entropy alloy. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 8, pp. 599–605. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-599-605>

## ВВЕДЕНИЕ

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) представляют собой новый класс металлических материалов, которые обладают свойствами, значительно превосходящими свойства обычных сплавов. Следствием этого является повышенный интерес исследователей в области физического материаловедения к таким материалам [1 – 4]. В 2004 г. Cantor с соавторами [5, 6] впервые обратили внимание на ВЭС на основе переходных 3D элементов с разной кристаллической структурой: кобальт (ГПУ), железо (ОЦК), хром (ОЦК), марганец (ОЦК), никель (ГЦК). Таких элементов в действительности 38. Высокоэнтропийные сплавы содержат до пяти – шести элементов в концентрации 5 – 35 %.

В последние годы наблюдается экспоненциальный рост количества публикаций, посвященных созданию и изучению ВЭС. Только за последнее десятилетие их количество в журналах Elsevier возросло почти в сто раз [5]. Кроме традиционных технологий получения ВЭС (таких как различные виды литья) разрабатываются методы порошковой металлургии, лазерной и плазменной наплавки, аддитивные технологии [2, 3].

Один из наиболее изученных ВЭС – сплав CrMnFeCoNi (сплав «Cantor») [5, 7 – 9] с ГЦК решеткой, обладает отличными механическими свойствами, особенно при криогенных температурах (ударная вязкость превышает 200 МПа·м<sup>2</sup>, повышенное сопротивление ползучести [5]). Однако этот сплав обладает невысокой прочностью (менее 400 МПа) при комнатной температуре, что вызывает необходимость его улучшения [10]. Были предприняты значительные усилия решения этой проблемы за счет зернограничного упрочнения [7, 8], твердорастворного упрочнения [9 – 11], упрочнения выделениями [12] и соответствующими теоретическими разработками [13]. Другим путем увеличения прочности является частичная аморфизация, поскольку аморфная структура не содержит границ зерен или дислокаций [14]. Вместе с тем ВЭС CrMnFeCoNi обладает повышенной пластичностью и является одним из самых вязких при повышенных температурах [15].

Сравнительно недавно было показано, что в двухфазном ВЭС Fe<sub>50</sub>Mn<sub>30</sub>Co<sub>10</sub>Cr<sub>10</sub> возможно достижение

прочности и пластичности одновременно за счет деформационно-индуцированного превращения ГЦК решетки в ОЦК или ГПУ фазы [16].

Особенно хотелось бы отметить работы по созданию нанокристаллического состояния в ВЭС, например, путем высокого давления при кручении [17]. Недостатком такого подхода является ограниченная пластичность высокопрочного сплава. Выход из ситуации возможен за счет создания бимодального распределения размера зерен путем соответствующей термообработки после деформации кручением при высоком давлении. Это может быть обусловлено тем, что крупные зерна больше аккомодируют деформацию, тогда как мелкие находятся в более сложном напряженно-деформированном состоянии, накапливают дислокации и обеспечивают деформационное упрочнение [17]. Значительного улучшения свойств поверхностных слоев сплавов можно достичь за счет внешних энергетических воздействий, наиболее эффективными из которых являются электронные пучки [18 – 21]. Такие методы обработки могут стимулировать значительное расширение областей использования ВЭС.

Трудности в сравнительном анализе работ по улучшению механических свойств и перспективам их практического использования связаны во многом с различными методами их получения и их составом. Это определяющим образом влияет на роль энтропии, искажений кристаллической решетки, ближнего порядка, слабого диффузионного эффекта, «коктейль» эффекта [5]. Высокоэнтропийный эффект заключается в том, что при разной энтропии смешивания и числе элементов в эквимольном ВЭС может быть сформирована как однофазная, так и многофазная структура. Различие в атомных размерах обеспечивает интенсивное искажение кристаллической решетки. Роль короткодействующего химического порядка конечно же важна и в настоящее время активно исследуется [5].

Значительное изменение потенциальной энергии в узлах решетки для составляющих элементов ответственно за высокую энергию активации миграции атомов и пониженные скорости диффузии, что приводит к «вялой» (как описывается в англоязычной литературе) диффузии. «Коктейль» эффект без особого научного

базиса способен формировать непредсказуемые синергетические свойства в ВЭС [22]. Проанализируем, тем не менее, последние публикации по этой проблеме для высокоэнтропийного сплава Cantor CrMnFeCoNi.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Создание бимодального распределения зерен по размерам ВЭС для повышения прочности и пластичности выглядит привлекательным из-за кажущейся простоты реализации [23]. Авторы работ [17, 23, 24] создавали бимодальное распределение зерен путем прокатки иковки гомогенизированных при 1200 °С слитков с последующей интенсивной пластической деформацией кручением при давлении 7,8 ГПа. Бимодальное распределение достигалось термообработкой при промежуточных температурах. Сплав CrMnFeCoNi остается однофазным при температуре выше 800 °С, но при кратковременном (до двух минут) отжиге достигалось до 2,5 % крупнозернистой структуры с одновременным возможным выделением второй фазы ( $\sigma$ -фазы), что является отрицательным эффектом. По мнению авторов работы [23] негативного эффекта можно избежать на стадии изготовления ВЭС путем более интенсивной консолидации крупных и нанозернистых порошков. Термообработка в течение двух минут ухудшает деформационное поведение сплава по сравнению с состоянием после интенсивной пластической деформации (табл. 1).

Сплав разрушался уже в области упругой деформации. При отжиге при 700 °С в течение 1 мин наблюдается сохранение пластичности при уменьшении прочности. Предполагается, что определенное влияние здесь могут оказывать полосы Людерса, не способные проходить через весь образец из-за малой скорости деформационного упрочнения, что приводит к локализации деформации [24]. Результаты фрактографического анализа свидетельствуют о вязком разрушении с образованием ямок. При отжиге при 600 °С ямки мелкие и неглубокие, тогда как при отжиге при 700 °С они больше и формируются вокруг выделений второй фазы. При отжиге при 600 °С отмечается сдвиговое разрушение, а разрушение при 700 °С формирует чашечный и конусный излом.

Обнадёживающе выглядят результаты по формированию прочного ВЭС путем создания наноструктурного

двухфазного аморфно-кристаллического состояния [10]. Наноструктурированный ВЭС Cr<sub>20</sub>Mn<sub>20</sub>Fe<sub>20</sub>Co<sub>20</sub>Ni<sub>20</sub> (ат. %), полученный методом магнетронного распыления, был подвергнут отжигу при 300 °С (состояние 1) и 450 °С (состояние 2). На рентгенограммах образцов (состояние 1) не было обнаружено кристаллического состояния ввиду исключительно малого размера зерен. Данные ПЭМ свидетельствовали о зернах размером приблизительно 3,8 нм, равномерно распределенных в аморфных оболочках. Размер зерен в образцах (состояние 1 и 2) после термообработки вырос приблизительно до 5,8 и 7,2 нм соответственно. Для сплава Cantor это минимальные размеры зерен, упоминаемые в литературе. В исходном состоянии (без термообработки) нанотвердость ( $H_n$ ) составляет 8,93 ГПа, модуль упругости ( $E$ ) 162 ГПа (табл. 2).

Высокий уровень наблюдаемых механических свойств, по мнению авторов работы [10], обусловлен двухфазной структурой этого сплава. Наличие аморфной составляющей ведет к снижению уровня напряжений для размножения дислокаций по сравнению с однородным нанокристаллическим состоянием. Кроме того, на межфазной аморфно-кристаллической границе будет наблюдаться более эффективное поглощение дислокаций по сравнению с обычным зернограничным. Вследствие этого для исходного состояния напряжения, необходимые для размножения дислокаций, будут меньше. После термообработки при 300 °С (состояние 1) объемная доля аморфной фазы будет меньше, твердость лишь немного меньше предсказываемого соотношением Холла-Петча. Уменьшение толщины аморфной прослойки, окружающей крошечные нанокристаллы, ведет к ослаблению способности зарождения и поглощения дислокаций на межфазной аморфно-кристаллической границе. Такая двухфазная структура для исходного состояния и после термообработки при 300 °С подобна двухфазному сплаву Cantor, синтезированному разломом и искровым плазменным спеканием [25]. Такая структура обладает достаточно высокой (6,3 ГПа) твердостью для зерен размером примерно 80 нм, поскольку содержит ГЦК и обогащенную хромом ОЦК фазы. Это дает основание с оптимизмом относиться к возможности увеличения твердости при создании двухфазных ВЭС Cantor.

Т а б л и ц а 1

### Механические свойства сплава CrMnFeCoNi [23]

Table 1. Mechanical properties of CrMnFeCoNi alloy [23]

| Микроструктурное состояние                      | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % | $\sigma_{0,2}$ , МПа | $\psi$ , % |
|---|------------------|--------------|----------------------|------------|
| Крупнозернистый сплав                           | 641 ± 10         | 25,0 ± 2,0   | 329 ± 30             | 76 ± 6     |
| Сплав после интенсивной пластической деформации | 1924 ± 124       | 3,2 ± 1,3    | 1787 ± 200           | 30 ± 13    |
| Сплав после термообработки при 600 °С (2 мин)   | 1669 ± 266       | 1,5 ± 0,3    | –                    | –          |
| Сплав после термообработки при 700 °С (1 мин)   | 1216 ± 148       | 5,4 ± 1,5    | 1207 ± 151           | 53 ± 5     |

Механические свойства сплава Cantor после термообработки [10]

Table 2. Mechanical properties of the alloy Cantor after heat treatment [10]

| Состояние            | Структура   | Размер зерна, нм | $E$ , ГПа | $H_{x-n}$ , ГПа | $H_n$ , ГПа | $\Delta H = H_n - H_{x-n}$ , ГПа |
|----------------------|---|------------------|-----------|-----------------|-------------|----------------------------------|
| Исходное             | стеклянная (аморфная) оболочка + нанозерно          | 3,8              | 162       | 12,20           | 8,93        | -3,27                            |
| Состояние 1 (300 °С) | размытая стеклянная (аморфная) оболочка + нанозерно | 5,8              | 183       | 10,11           | 9,44        | -0,67                            |
| Состояние 2 (450 °С) | монолитное нанозерно                                | 7,2              | 220       | 9,20            | 13,76       | 4,56                             |

П р и м е ч а н и е.  $H_{x-n}$  – твердость по соотношению Холла-Петча.

Высокая стоимость кобальта и хрома, используемых в сплаве Cantor, заставляет исследователей искать пути создания ВЭС с их меньшим содержанием, но с повышенными механическими свойствами. Такие свойства могут быть достигнуты за счет эффекта пластичности, индуцированной превращением (transformation – induced plasticity – TRIP) [16, 26, 27]. В однофазном сплаве  $(CrMnFeCoNi)_{50}Fe_{50}$  с ГЦК структурой, полученном методом лазерной аддитивной технологии, при деформации до разрушения образовывалось до 55 % ОЦК структуры при соответствующем снижении ГЦК фазы до 45 % [28]. Как и в работе [29], это происходило бездиффузионным путем.

По сравнению с традиционным ВЭС сплав Cantor  $(CrMnFeCoNi)_{50}Fe_{50}$  обладает высокими прочностными параметрами (предел прочности 415 – 470 МПа) и пластичностью на уровне 45 – 77 % [28]. Фаза ОЦК образовалась в зоне пересечения полос сдвига в зернах ГЦК фазы.

Для понимания природы улучшения механических свойств ВЭС важно знать механизмы пластической деформации и упрочнения. Выполненный в работе [30] комплекс исследований микроструктурных изменений для ВЭС Cantor при низких и комнатных температурах вносит вклад в решение этой проблемы. Было показано, что для традиционно выплавленного сплава до деформации приблизительно 7,4 % при 77 К и приблизительно 25 % при 293 К пластичность является дислокационной. Растягивающие напряжения начала двойникования составляют примерно 720 МПа, а сдвиговые – примерно 235 МПа. Модуль сдвига уменьшается с ростом деформации при 77 и 293 К.

При температуре 77 К вклад двойниковых сдвигов в общую деформацию невелик из-за сравнительно низкой объемной доли двойников. Но он существенен в деформационном упрочнении из-за возникновения границ раздела («динамическое» соотношение Холла-Петча).

Вне зоны 7,4 % истинной деформации скорость упрочнения постоянна при 77 К, поскольку активируется двойникование, которое создает новые границы раздела. При комнатной температуре наблюдается умень-

шение скорости упрочнения с ростом деформации из-за их отсутствия вплоть до разрушения.

Таким образом, комбинация повышенных свойств прочность – пластичность при низких температурах по сравнению с комнатными обусловлена более ранним двойникованием, обеспечивающим дополнительное упрочнение. В соответствии с этим авторы работы [30] показывают, что предварительно продеформированные при 77 К образцы для образования нанодвойников при последующем нагружении при 293 К проявляют повышенные прочность и пластичность по сравнению с недеформированными.

Эту точку зрения разделяют китайские исследователи, данные которых были получены на ВЭС, изготовленном по лазерной аддитивной технологии [31]. Преимущество такой технологии состоит в большой скорости затвердевания ( $10^4 - 10^6$  К/с), способствующей улучшению растворимости и обеспечивающей формирование твердорастворной фазы. При этом микроструктура является однородной из-за подавления сегрегаций элементов. Плотность дислокаций выше, чем в ВЭС Cantor, полученном в работе [30] путем традиционной плавки благодаря высоким скоростям затвердевания. Это является решающим моментом в увеличении предела текучести по сравнению со сплавом с таким же размером зерна [32].

На начальных стадиях деформации дислокационное скольжение является преобладающим механизмом, а появляющиеся на поздних стадиях двойники улучшают и прочность, и пластичность, особенно при низких температурах. Формирование препятствий для движения дислокаций из-за двойникования несомненно упрочняет сплав.

Облучение импульсными электронными пучками с плотностью энергии 30 Дж/см<sup>2</sup> не изменяет элементный состав сплава, полученного методом проволоочно-дугового аддитивного производства ВЭС AlCoCrFeNi, сопровождается гомогенизацией поверхностного слоя и образованием субмикро-нанокристаллической структуры ([33], что должно обеспечивать, в соответствии с результатами [18 – 21], повышение механических свойств.

## Выводы

В последние годы отмечен экспоненциальный рост количества исследований высокоэнтروпийных сплавов, которые обладают высокими механическими и эксплуатационными свойствами. Сделана попытка выполнить краткий анализ последних публикаций в основном зарубежных авторов по поиску возможных путей улучшения механических свойств классического ВЭС Cantor

(CoCrMnFeNi). Акцентируется внимание на создании бимодального распределения размеров зерен, формировании наноразмерного масштаба зерен с аморфным окружением, эффекте пластичности, индуцированном фазовым превращением ГЦК → ОЦК, роли смены дислокационного скольжения на двойникование, а также применении внешних энергетических воздействий. Указаны трудности проведения сравнительного анализа путей повышения механических свойств.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Yeh J.W. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys // *JOM. The Journal of the minerals, metals and materials society*. 2013. Vol. 65. No. 12. P. 1759–1771. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0761-6>
2. Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys // *Annales de Chimie: Science des Materiaux*. 2006. Vol. 31. No. 6. P. 633–648. <https://doi.org/10.3166/acsm.31.633-648>
3. Осинцев К.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А. Высокоэнтропийные сплавы: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021. Т. 64. № 4. С. 249–258. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-249-258>
4. Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Осинцев К.А., Рубанникова Ю.А., Перегудов О.А., Семин А.П. Высокоэнтропийные сплавы. Новокузнецк: Полиграфист, 2021. 178 с.
5. Li Z., Zhao S., Ritchie R.O., Meyers M.A. Mechanical properties of high-entropy alloys with emphasis on face-centered cubic alloys // *Progress in Materials Science*. 2019. Vol. 102. P. 296–345. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.12.003>
6. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2004. Vol. 375–77. P. 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
7. Otto F., Dlouhý A., Somsen Ch., Bei H., Eggeler G., George E.P. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61. No. 15. P. 5743–5755. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.06.018>
8. Schuh B., Mendez-Martin F., Völker B., George E.P., Clemens H., Pippin R., Hohenwarter A. Mechanical properties, microstructure and thermal stability of a nanocrystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy after severe plastic deformation // *Acta Materialia*. 2015. Vol. 96. P. 258–268. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.025>
9. Li Z., Tasan C.C., Springer H., Gault B., Raabe D. Interstitial atoms enable joint twinning and transformation induced plasticity in strong and ductile high-entropy alloys // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. Article 40704. <https://doi.org/10.1038/srep40704>
10. Xiao L.L., Zheng Z.Q., Guo S.W., Huang P., Wang F. Ultra-strong nanostructured CrMnFeCoNi high entropy alloys // *Materials and Design*. 2020. Vol. 194. Article 108895. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108895>
11. Coury F.G., Kaufman M., Clarke A.J. Solid-solution strengthening in refractory high entropy alloys // *Acta Materialia*. 2019. Vol. 175. P. 66–81. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.06.006>
12. Ikeda Y., Tanaka I., Neugebauer J., Körmann F. Impact of interstitial C on phase stability and stacking-fault energy of the CrMnFeCoNi high-entropy alloy // *Physical Review Materials*. 2019. Vol. 3. No. 11. Article 113603. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.113603>
13. Laplanche G., Kostka A., Horst O.M., Eggeler G., George E.P. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy // *Acta Materialia*. 2016. Vol. 118. P. 152–163. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.038>
1. Yeh J.W. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys. *JOM. The Journal of the minerals, metals and materials society*. 2013, vol. 65, no. 12, pp. 1759–1771. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0761-6>
2. Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys. *Annales de Chimie: Science des Materiaux*. 2006, vol. 31, no. 6, pp. 633–648. <https://doi.org/10.3166/acsm.31.633-648>
3. Osintsev K.A., Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Panchenko I.A. High-entropy alloys: Structure, mechanical properties, deformation mechanisms and application. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 249–258. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-249-258>
4. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A., Rubannikova Yu.A., Peregudov O.A., Semin A.P. *High Entropy Alloys*. Novokuznetsk: Poligrafist, 2021, 178 p. (In Russ.).
5. Li Z., Zhao S., Ritchie R.O., Meyers M.A. Mechanical properties of high-entropy alloys with emphasis on face-centered cubic alloys. *Progress in Materials Science*. 2019, vol. 102, pp. 296–345. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.12.003>
6. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2004, vol. 375–77, pp. 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
7. Otto F., Dlouhý A., Somsen Ch., Bei H., Eggeler G., George E.P. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2013, vol. 61, no. 15, pp. 5743–5755. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.06.018>
8. Schuh B., Mendez-Martin F., Völker B., George E.P., Clemens H., Pippin R., Hohenwarter A. Mechanical properties, microstructure and thermal stability of a nanocrystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy after severe plastic deformation. *Acta Materialia*. 2015, vol. 96, pp. 258–268. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.025>
9. Li Z., Tasan C.C., Springer H., Gault B., Raabe D. Interstitial atoms enable joint twinning and transformation induced plasticity in strong and ductile high-entropy alloys. *Scientific Reports*. 2017, vol. 7, article 40704. <https://doi.org/10.1038/srep40704>
10. Xiao L.L., Zheng Z.Q., Guo S.W., Huang P., Wang F. Ultra-strong nanostructured CrMnFeCoNi high entropy alloys. *Materials and Design*. 2020, vol. 194, article 108895. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108895>
11. Coury F.G., Kaufman M., Clarke A.J. Solid-solution strengthening in refractory high entropy alloys. *Acta Materialia*. 2019, vol. 175, pp. 66–81. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.06.006>
12. Ikeda Y., Tanaka I., Neugebauer J., Körmann F. Impact of interstitial C on phase stability and stacking-fault energy of the CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Physical Review Materials*. 2019, vol. 3, no. 11, article 113603. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.113603>
13. Laplanche G., Kostka A., Horst O.M., Eggeler G., George E.P. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2016, vol. 118, pp. 152–163. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.038>

14. Li F., Zhao H., Yue Y., Yang Z., Zhang Y., Guo L. Dual-phase super-strong and elastic ceramic // *ACS Nano*. 2019. Vol. 13. No. 4. P. 4191–4198. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b09195>
15. Gludovatz B., Hohenwarter A., Catoor D., Chang E.H., George E.P., Ritchie R.O. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications // *Science*. 2014. Vol. 345. No. 6201. P. 1153. <https://doi.org/10.1126/science.1254581>
16. Li Z., Körmann F., Grabowski B., Neugebauer J., Raabe D. Ab initio assisted design of quinary dual-phase high-entropy alloys with transformation-induced plasticity // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 136. P. 262–270. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.07.023>
17. Schuh B., Völker B., Todt J., Kormout K.S., Hohenwarter A., Schell N. Influence of annealing on microstructure and mechanical properties of a nanocrystalline CrCoNi medium-entropy alloy // *Materials*. 2018. Vol. 11. No. 5. Article 662. <https://doi.org/10.3390/ma11050662>
18. Усталость сталей, модифицированных высокоинтенсивными электронными пучками / В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, С.В. Воробьев, С.В. Горбунов, Д.А. Бессонов, В.В. Сизов, С.В. Коновалов. Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2012. 403 с.
19. Коновалов С.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Влияние электромагнитных полей и токов на пластическую деформацию металлов и сплавов. Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2013. 293 с.
20. Громов В.Е., Аксенова К.В., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф. Повышение усталостного ресурса силумина электронно-пучковой обработкой // *Успехи физики металлов*. 2015. Т. 16. № 4. С. 265–297.
21. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Konovalov S.V., Alsarava K.V. Structural evolution of silumin treated with a high-intensity pulse electron beam and subsequent fatigue loading up to failure // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*. 2015. Vol. 79. No. 9. P. 1169–1172. <https://doi.org/10.3103/S1062873815090087>
22. Ranganathan S. Alloyed pleasures: Multimetallic cocktails // *Current Science*. 2003. Vol. 85. P. 1404–1406.
23. Schuh B., Pippan R., Hohenwarter A. Tailoring bimodal grain size structures in nanocrystalline compositionally complex alloys to improve ductility // *Materials Science and Engineering: A*. 2019. Vol. 748. P. 379–385. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.073>
24. Tian Y.Z., Gao S., Zhao L.J., Lu S., Pippan R., Zhang Z.F., Tsuji N. Remarkable transitions of yield behavior and Lüders deformation in pure Cu by changing grain sizes // *Scripta Materialia*. 2018. Vol. 142. P. 88–91. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.08.034>
25. Abhijit A., Varghese J., Chalavadi P., Sai Karthik P., Bhanu Sankara Rao K., Rajulapati K.V. Negative strain rate sensitivity in two-phase nanocrystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy with broader grain size distribution studied by nanoindentation // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2019. Vol. 72. No. 10. P. 2861–2867. <https://doi.org/10.1007/s12666-019-01762-5>
26. Li Z., Gokuldoss Pradeep K., Deng Y., Raabe D., Tasan C.C. Metastable high-entropy dual-phase alloys overcome the strength-ductility trade-off // *Nature*. 2016. Vol. 534. P. 227–230. <https://doi.org/10.1038/nature17981>
27. Bae J.W., Seol J.B., Moon J., Sohn S.S., Jang M.J., Um H.Y., Lee B.-J., Kim H.S. Exceptional phase-transformation strengthening of ferrous medium-entropy alloys at cryogenic temperatures // *Acta Materialia*. 2018. Vol. 161. P. 388–399. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.09.057>
28. Li J., Luan H., Zhou L., Amar A., Li R., Huang L., Liu X., Le G., Wang X., Wu J., Jiang C. Phase transformation – induced strengthening of an additively manufactured multi-principal element CrMnFeCoNi alloy // *Materials and Design*. 2020. Vol. 195. Article 108999. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108999>
29. Huang H., Wu Y., He J., Wang H., Liu X., An K., Wu W., Lu Z. Phase-transformation ductilization of brittle high-entropy alloys via metastability engineering // *Advanced Materials*. 2017. Vol. 29. No. 30. Article 1701678. <https://doi.org/10.1002/adma.201701678>
30. Laplanche G., Kostka A., Horst O.M., Eggeler G., George E.P. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy // *Acta Materialia*. 2016. Vol. 118. P. 152–163. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.038>
14. Li F., Zhao H., Yue Y., Yang Z., Zhang Y., Guo L. Dual-phase super-strong and elastic ceramic. *ACS Nano*. 2019, vol. 13, no. 4, pp. 4191–4198. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b09195>
15. Gludovatz B., Hohenwarter A., Catoor D., Chang E.H., George E.P., Ritchie R.O. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications. *Science*. 2014, vol. 345, no. 6201, pp. 1153. <https://doi.org/10.1126/science.1254581>
16. Li Z., Körmann F., Grabowski B., Neugebauer J., Raabe D. Ab initio assisted design of quinary dual-phase high-entropy alloys with transformation-induced plasticity. *Acta Materialia*. 2017, vol. 136, pp. 262–270. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.07.023>
17. Schuh B., Völker B., Todt J., Kormout K.S., Hohenwarter A., Schell N. Influence of annealing on microstructure and mechanical properties of a nanocrystalline CrCoNi medium-entropy alloy. *Materials*. 2018, vol. 11, no. 5, article 662. <https://doi.org/10.3390/ma11050662>
18. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorob'ev S.V., Gorbunov S.V., Bessonov D.A., Sizov V.V., Konovalov S.V. *Fatigue of Steels Modified with High-Intensity Electron Beams*. Novokuznetsk: Inter-Kuzbass, 2012, 403 p. (In Russ.).
19. Konovalov S.V., Gromov V.E., Ivanov Yu.F. *Influence of Electromagnetic Fields and Currents on Plastic Deformation of Metals and Alloys*. Novokuznetsk: Inter-Kuzbass, 2013, 293 p. (In Russ.).
20. Gromov V.E., Akseanova K.V., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F. Increasing the fatigue life of silumin by electron beam treatment. *Uspekhi fiziki metallov*. 2015, vol. 16, no. 4, pp. 265–297. (In Russ.).
21. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Glezer A.M., Konovalov S.V., Alsarava K.V. Structural evolution of silumin treated with a high-intensity pulse electron beam and subsequent fatigue loading up to failure. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics*. 2015, vol. 79, no. 9, pp. 1169–1172. <https://doi.org/10.3103/S1062873815090087>
22. Ranganathan S. Alloyed pleasures: Multimetallic cocktails. *Current Science*. 2003, vol. 85, pp. 1404–1406.
23. Schuh B., Pippan R., Hohenwarter A. Tailoring bimodal grain size structures in nanocrystalline compositionally complex alloys to improve ductility. *Materials Science and Engineering: A*. 2019, vol. 748, pp. 379–385. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.073>
24. Tian Y.Z., Gao S., Zhao L.J., Lu S., Pippan R., Zhang Z.F., Tsuji N. Remarkable transitions of yield behavior and Lüders deformation in pure Cu by changing grain sizes. *Scripta Materialia*. 2018, vol. 142, pp. 88–91. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2017.08.034>
25. Abhijit A., Varghese J., Chalavadi P., Sai Karthik P., Bhanu Sankara Rao K., Rajulapati K.V. Negative strain rate sensitivity in two-phase nanocrystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy with broader grain size distribution studied by nanoindentation. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2019, vol. 72, no. 10, pp. 2861–2867. <https://doi.org/10.1007/s12666-019-01762-5>
26. Li Z., Gokuldoss Pradeep K., Deng Y., Raabe D., Tasan C.C. Metastable high-entropy dual-phase alloys overcome the strength-ductility trade-off. *Nature*. 2016, vol. 534, pp. 227–230. <https://doi.org/10.1038/nature17981>
27. Bae J.W., Seol J.B., Moon J., Sohn S.S., Jang M.J., Um H.Y., Lee B.-J., Kim H.S. Exceptional phase-transformation strengthening of ferrous medium-entropy alloys at cryogenic temperatures. *Acta Materialia*. 2018, vol. 161, pp. 388–399. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.09.057>
28. Li J., Luan H., Zhou L., Amar A., Li R., Huang L., Liu X., Le G., Wang X., Wu J., Jiang C. Phase transformation – induced strengthening of an additively manufactured multi-principal element CrMnFeCoNi alloy. *Materials and Design*. 2020, vol. 195, article 108999. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108999>
29. Huang H., Wu Y., He J., Wang H., Liu X., An K., Wu W., Lu Z. Phase-transformation ductilization of brittle high-entropy alloys via metastability engineering. *Advanced Materials*. 2017, vol. 29, no. 30, article 1701678. <https://doi.org/10.1002/adma.201701678>
30. Laplanche G., Kostka A., Horst O.M., Eggeler G., George E.P. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2016, vol. 118, pp. 152–163. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.038>

31. Qiu Z., Yao C., Feng K., Li Z., Chu P.K. Cryogenic deformation mechanism of CrMnFeCoNi high-entropy alloy fabricated by laser additive manufacturing process // *International Journal of Light-weight Materials and Manufacture*. 2018. Vol. 1. No. 1. P. 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.02.001>
32. Otto F., Dlouhý A., Somsen C., Bei H., Eggeler G., George E.P. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61. No. 15. P. 5743–5755. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.06.018>
33. Осинцев К.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А., Чэнь С. Влияние облучения импульсным электронным пучком на структуру поверхности не эквивалентного высокоэнтропийного сплава AlCoFeCrNi // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2021. № 8. С. 76–81. <https://doi.org/10.31857/S1028096021080112>
31. Qiu Z., Yao C., Feng K., Li Z., Chu P.K. Cryogenic deformation mechanism of CrMnFeCoNi high-entropy alloy fabricated by laser additive manufacturing process. *International Journal of Light-weight Materials and Manufacture*. 2018, vol. 1, no. 1, pp. 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.02.001>
32. Otto F., Dlouhý A., Somsen C., Bei H., Eggeler G., George E.P. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2013, vol. 61, no. 15, pp. 5743–5755. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.06.018>
33. Osintsev K.A., Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu. F., Panchenko I.A., Chen S. Effect of pulsed electron beam irradiation on the surface structure of a non-equiatom high-entropy alloy of the Al–Co–Cr–Fe–Ni. *System Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya*. 2021, no. 8, pp. 76–81. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S1028096021080112>

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Виктор Евгеньевич Громов**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0002-5147-5343  
**E-mail:** gromov@physics.sibsiu.ru

**Юлия Андреевна Рубанникова**, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0001-5677-1427  
**E-mail:** rubannikova96@mail.ru

**Сергей Валерьевич Коновалов**, д.т.н., заведующий кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, профессор, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0003-4809-8660  
**E-mail:** ksv@ssau.ru

**Кирилл Александрович Осинцев**, аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0003-1150-6747  
**E-mail:** osincev.ka@ssau.ru

**Сергей Владимирович Воробьев**, д.т.н., старший научный сотрудник Управления научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0003-3957-0249  
**E-mail:** sparrow1981@mail.ru

**Viktor E. Gromov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0002-5147-5343  
**E-mail:** gromov@physics.sibsiu.ru

**Yuliya A. Rubannikova**, Postgraduate of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0001-5677-1427  
**E-mail:** rubannikova96@mail.ru

**Sergei V. Konovalov**, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Chair of Metals Technology and Aviation Materials, Samara National Research University, Prof., Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0003-4809-8660  
**E-mail:** ksv@ssau.ru

**Kirill A. Osintsev**, Postgraduate of the Chair of Metals Technology and Aviation Materials, Samara National Research University, Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0003-1150-6747  
**E-mail:** osincev.ka@ssau.ru

**Sergei V. Vorob'ev**, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher of Department of Scientific Researches, Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0003-3957-0249  
**E-mail:** sparrow1981@mail.ru

## ВКЛАД АВТОРОВ:

**Громов В.Е.** – сравнительный анализ различных способов улучшения механических свойств ВЭС Cantor в широком интервале температур.

**Коновалов С.В.** – сравнение данных микроструктурных исследований и механизмов пластической деформации и управления ВЭС Cantor при 77 К и 293 К. Выявление роли двойникования в формировании комплекса комбинации повышенных свойств «прочность–пластичность».

**Осинцев К.А.** – оценка роли способа получения ВЭС Cantor в формировании высокого уровня механических свойств.

**Рубанникова Ю.А.** – подбор англоязычной литературы по возможным способам улучшения механических свойств ВЭС Cantor за последние годы.

**Воробьев С.В.** – выявление трудностей при анализе работ по улучшению механических свойств с учетом роли энтропии, искажений кристаллической, ближнего порядка, слабой диффузии и «коктейль» эффекта.

Поступила в редакцию 27.04.2021  
 После доработки 11.05.2021  
 Принята к публикации 12.05.2021

Received 27.04.2021  
 Revised 11.05.2021  
 Accepted 12.05.2021

**Краткое сообщение**

УДК 658.51:669(075)

DOI 10.17073/0368-0797-2021-8-606-610



## РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА НОРМАТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

**В. Н. Кадыков, А. И. Мусатова, Р. С. Койнов****■** Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Методология нормативных моделей, алгоритмы их построения, а также процедуры применения в задачах управления и оптимизации производственных объектов должны в полной мере отвечать современным требованиям (многовариантность, ситуационность, комплексность, оптимальность, динамичность, гибкость). Рассмотрены аспекты построения и применения нормативных моделей функционирования подразделений металлургического предприятия.

**Ключевые слова:** модели, нормативы, комплекс, принципы, методика, показатели

**Для цитирования:** Кадыков В.Н., Мусатова А.И., Койнов Р.С. Разработка комплекса нормативных моделей функционирования подразделений металлургического предприятия // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 8. С. 606–610.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-606-610>

**Short report**

## DEVELOPMENT OF A SET OF REGULATORY MODELS FOR METALLURGICAL ENTERPRISE DIVISIONS FUNCTIONING

**V. N. Kadykov, A. I. Musatova, R. S. Koinov****■** Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

**Abstract.** Methodology of normative models, algorithms for their construction, as well as procedures for application in production facilities control and optimization tasks should fully meet modern requirements: multivariate, case-orientation, complexity, optimality, dynamism, flexibility. The listed aspects of construction and application of normative models for functioning of metallurgical enterprise divisions are presented in this work.

**Keywords:** models, standards, complex, principles, methodology, indicators

**For citation:** Kadykov V. N., Musatova A. I., Koinov R. S. Development of a set of regulatory models for metallurgical enterprise divisions functioning. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 8, pp. 606–610. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-606-610>

Первоначально рассматривается задача построения комплекса взаимосвязанных нормативных моделей производственной системы, в качестве которой выбрано металлургическое предприятие, и определены особенности его функционирования. Нормативная модель соотносится с человеко-технической, социальной, экономической или иными организационными системами, которые предназначены для определения оптимальных (научно обоснованных) нормативных показателей объекта моделирования [1–3]. Такие модели должны систематически корректироваться с учетом совершенствования оборудования, изменений в сорimente выпускаемой продукции, технологии, организации производства и труда.

С целью оптимизации и прогнозирования многовариантного функционирования металлургических подразделений созданы ситуационно-нормативные модели работы производственных систем (ПС), синтез которых опирается на предлагаемые принципы:

– оптимальность (направленность нормирующей системы на постановку и решение задачи оптимизации нормируемых процессов, при этом целесообразно использовать методы скалярной или векторной оптимизаций);

– декомпозиция (многоступенчатое разделение сложного комплекса на подразделения, участки, агрегаты, машины, а также производственного процесса на подпроцессы, операции, элементы, микроэлементы, по

отношению к которым ставится и решается конкретная задача нормирования);

- ситуационность (дифференциация нормативов с учетом многообразия производственных ситуаций, различающихся количеством используемого оборудования и режимами его работы, характеристиками сырья и полуфабрикатов, технологическими маршрутами производства по видам продукции, другими признаками);

- динамичность (соответствие нормативов темпам изменения свойств производственной системы и ее внешних воздействий);

- комплексность (целесообразность отражения в нормативах взаимодействия различных факторов: временных, организационно-технических, психофизиологических, экономических, социальных, экологических);

- активность (способность персонала учитывать в работе не только цели, заданные планирующим центром, но и собственные цели, а также иметь возможность их реализации);

- информативность (отбор и первоочередное использование достоверных данных для оценивания нормативов);

- адекватность (соответствие нормативной модели ее эффективному применению в системе управления).

Методика построения комплекса нормативных моделей для прогнозирования работы и оптимизации производственных объектов включает следующие действия:

- определение факторов внешней среды, входов и выходов производственной системы, ее структуры, участков, агрегатов, оборудования, их технические и технологические параметры, анализ и классификация сортамента продукции;

- проведение наблюдений за работой основного и вспомогательного оборудования, обслуживающего и управленческого персонала; мониторинговое слежение за процессом производства, за организацией материальных потоков; сбор информации о параметрах и показателях оперативного и статистического учета; уточнение множества ситуаций по количеству установленных и работающих единиц оборудования по участкам, определение характера связей между ними; обработка и анализ полученной информации, в том числе о простоях оборудования, причинах их возникновения; оценка вероятности отказов оборудования;

- установление последовательности и периодичности производственных процессов, циклов операций по технологическим маршрутам; разработка маршрутных графиков производственных процессов, схем организации материальных потоков, совмещенных с планом расположения оборудования; разработка схем последовательности выполнения производственных процессов, операций, элементов и микроэлементов;

- выбор методов нормирования длительности операций (технологических, естественных, транспортных,

контрольных, трудовых) по элементам, микроэлементам и простоев по причинам их возникновения (техническим, технологическим, организационным, внешним);

- синтез аналитических моделей технически возможных и нормативных тактов оборудования, участков при их автономной работе; оценивание тактов производственной системы для разных ситуаций по видам продукции;

- формирование ситуационно-нормативных моделей оценки производительности и длительности производственных циклов системы; проверка адекватности нормативных моделей путем оценивания их эффективности на основе имитационно-нормативного моделирования с использованием реальных производственных данных.

Пример построения и реализации нормативной модели производительности волочильных станов представлен в работе [4].

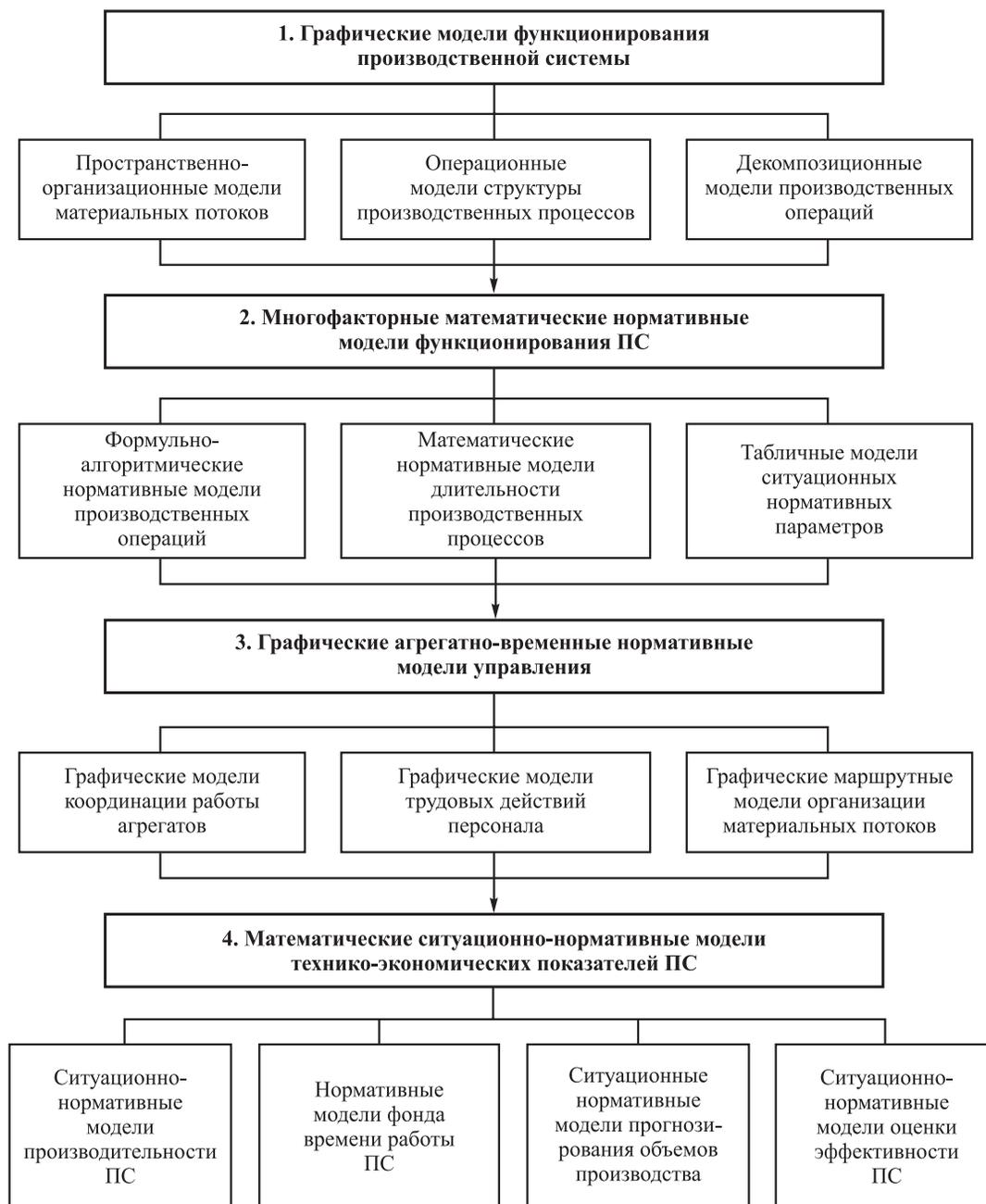
Для принятия рациональных управленческих решений в действующих производственных системах разработана методика построения нормативных моделей, представленных на рисунке в виде схемы многоуровневого комплекса взаимосвязанных графических и математических моделей, а также сравнительной оценки показателей финансовых результатов (см. таблицу) предприятия без использования (база) и с использованием нормативных моделей (норматив – отчет).

К графическим моделям функционирования производственных систем (ПС) относятся модели пространственной организации материальных потоков, пооперационной структуры производственных процессов, декомпозиционные схемы производственных операций.

Структурированные многофакторные математические модели [5 – 7] функционирования производственных систем включают формульно-алгоритмические нормативные модели временных характеристик производственных процессов (длительность технологических, транспортных, трудовых, контрольных операций, циклов, тактов); математические модели длительности производственных процессов; табличные модели ситуационных нормативов временных характеристик процессов по видам продукции (сортаменту).

Графические агрегатно-временные нормативные модели функционирования производственных систем представляют собой комплексные графики, координирующие (управляющие) и отражающие последовательность и параллельность работы, загрузку оборудования, трудовые действия персонала, организацию материальных потоков [4].

Математические нормативные модели ситуационных технико-экономических показателей производственных систем включают оценки производительности ПС с учетом сортамента, нормативы фонда времени работы ПС, нормативные объемы производства продукции, прогнозы прибыли, рентабельности, а также табличные модели нормативных технико-экономических показателей.



Многоуровневый комплекс нормативных моделей функционирования производственных систем

Multilevel complex of normative models for production systems functioning

**Сравнительная оценка показателей финансовых результатов предприятия без использования (база) и с использованием нормативных моделей (норматив – отчет)**

**Comparative assessment of indicators of the enterprise financial results without using (base) and using normative models (standard – report)**

| Показатели деятельности предприятия | Значения показателей |          |        | Темп роста, % |         |
|-------------------------------------|----------------------|----------|--------|---------------|---------|
|                                     | база                 | норматив | отчет  | к базе        | к норме |
| Объем продаж, млн руб.              | 159,9                | 198,8    | 179,35 | 112,2         | 90,2    |
| Прибыль продукции, млн руб.         | 25,9                 | 33,7     | 30,25  | 116,8         | 89,8    |
| Рентабельность продукции, %         | 16,2                 | 17,0     | 16,87  | 104,1         | 99,2    |
| Коэффициент платежеспособности      | 1,01                 | 1,00     | 1,10   | 108,9         | 110,0   |

Процесс построения нормативных моделей функционирования человеко-технической системы включает следующие основные этапы:

- декомпозиция объекта на участки и единицы оборудования; декомпозиция производственного процесса и классификация операций, их элементов и микроэлементов с учетом следующих признаков: важность (основные, вспомогательные); степень механизации и автоматизации (аппаратурные, машинные, машинно-ручные, ручные); степень контролируемости (автоматически или частично контролируемые, неконтролируемые); степень визуальной наблюдаемости (открытые, закрытые, полузакрытые);

- выбор метода определения нормативных значений показателей для микроэлементов, элементов и операций;

- определение расчетной единицы продукции (штука, пакет, партия) и ее характеристик (масса, количество, длина, объем) для каждого вида оборудования;

- оценивание нормативных показателей для микроэлементов, элементов и операций в соответствии с выбранным методом нормирования, расчетной единицей продукции по производственным ситуациям и построением циклического графика работы каждого вида оборудования;

- определение ситуационных значений нормативных показателей для каждого участка с учетом пространственного размещения и характера взаимодействия оборудования; выбор нормативных значений для производственной системы (объекта) в целом.

На базе создания комплекса нормативных моделей функционирования подразделений металлургических предприятий разработаны нормативно-технические паспорта для некоторых прокатных и метизных цехов, где представлены в табличных формах обоснованные ситуационно-нормативные показатели по сортаменту продукции (длительности операций, такты процессов, производительность основного и вспомогательного оборудования, фонд времени, длительность производственных циклов на выполнение заказов), которые при изменении параметров дают возможность оперативно корректировать сменно-суточные задания.

## Выводы

Предлагаемый комплексный подход к построению нормативных моделей позволил оптимизировать процесс производства в подразделениях некоторых металлургических предприятий за счет внутренних резервов производства на основе совершенствования организационно-управленческих решений, в других случаях рассматривали варианты технических решений, направленных на улучшение качества и увеличение объемов выпускаемой продукции путем (частичной или полной) замены, модернизации действующего оборудования с учетом финансовых возможностей предприятия. Для обоснования оптимизационных решений использовали имитационно-нормативное моделирование и сравнительный анализ действующей и модернизированной производственной системы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

- Merrick J.H., Weyant J.P. On choosing the resolution of normative models // *European Journal of Operational Research*. 2019. Vol. 279. No. 2. P. 511–523. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.06.017>
- Gola A., Relich M., Kłosowski G., Świć A. Mathematical models for manufacturing systems capacity planning and expansion – An overview // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 791. P. 125–131. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.791.125>
- Abbas A.E., Matheson J.E. Normative decision making with multiattribute performance targets // *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. 2009. Vol. 16. No. 3-4. P. 67–78. <https://doi.org/10.1002/mcda.434>
- Мусатова А.И., Кулаков С.М. Особенности построения нормативной модели производительности волочильных станов // *Научное обозрение*. 2014. № 3. С. 139–149.
- Tilindis J., Kleiza V. Mathematical modeling of production operations and processes for product design and manufacturing // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 510. P. 243–247. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.510.243>
- Mohammad Hossein Zavvar Sabegh, Abolfazl Mirzazadeh, Eric C. Maass, Yucel Ozturkoglu, Mohammad Mohammadi, Shiva Moslemi. A mathematical model and optimization of total production cost and quality for a deteriorating production process // *Cogent Mathematics*. 2016. Vol. 3. No. 1. Article 1264175. <https://doi.org/10.1080/23311835.2016.1264175>
- Nourali S., Imanipour N., Shahriari M.R. A mathematical model for integrated process planning and scheduling in flexible assembly job shop environment with sequence dependent setup times // *International Journal of Mathematical Analysis*. 2012. Vol. 6. No. 43. P. 2117–2132.
- Merrick J.H., Weyant J.P. On choosing the resolution of normative models. *European Journal of Operational Research*. 2019, vol. 279, no. 2, pp. 511–523. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.06.017>
- Gola A., Relich M., Kłosowski G., Świć A. Mathematical models for manufacturing systems capacity planning and expansion – An overview. *Applied Mechanics and Materials*. 2015, vol. 791, pp. 125–131. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.791.125>
- Abbas A.E., Matheson J.E. Normative decision making with multiattribute performance targets. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. 2009, vol. 16, no. 3-4, pp. 67–78. <https://doi.org/10.1002/mcda.434>
- Musatova A.I., Kulakov S.M. Features of building a normative model of drawing mills productivity. *Nauchnoe obozrenie*. 2014, no. 3, pp. 139–149. (In Russ.).
- Tilindis J., Kleiza V. Mathematical modeling of production operations and processes for product design and manufacturing. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 510, pp. 243–247. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.510.243>
- Mohammad Hossein Zavvar Sabegh, Abolfazl Mirzazadeh, Eric C. Maass, Yucel Ozturkoglu, Mohammad Mohammadi, Shiva Moslemi. A mathematical model and optimization of total production cost and quality for a deteriorating production process. *Cogent Mathematics*. 2016, vol. 3, no. 1, article 1264175. <https://doi.org/10.1080/23311835.2016.1264175>
- Nourali S., Imanipour N., Shahriari M.R. A mathematical model for integrated process planning and scheduling in flexible assembly job shop environment with sequence dependent setup times. *International Journal of Mathematical Analysis*. 2012, vol. 6, no. 43, pp. 2117–2132.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Владимир Николаевич Кадыков**, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК», Сибирский государственный индустриальный университет

**ORCID:** 0000-0002-9263-8962

**E-mail:** kadykovvn18@yandex.ru

**Александра Ильинична Мусатова**, старший преподаватель кафедры «Менеджмент и отраслевая экономика», Сибирский государственный индустриальный университет

**ORCID:** 0000-0002-0171-5177

**E-mail:** musatova-ai@yandex.ru

**Роман Сергеевич Койнов**, старший преподаватель кафедры «Автоматизация и информационные системы», Сибирский государственный индустриальный университет

**ORCID:** 0000-0001-5547-5511

**E-mail:** koynov\_rs@mail.ru

**Vladimir N. Kadykov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Metal Forming and Metal Science. OJSC "EVRAZ ZSMK", Siberian State Industrial University

**ORCID:** 0000-0002-9263-8962

**E-mail:** kadykovvn18@yandex.ru

**Aleksandra I. Musatova**, Senior Lecturer of the Chair "Management and Branch Economy", Siberian State Industrial University

**ORCID:** 0000-0002-0171-5177

**E-mail:** musatova-ai@yandex.ru

**Roman S. Koynov**, Senior Lecturer of the Chair "Automation and Information Systems", Siberian State Industrial University

**ORCID:** 0000-0001-5547-5511

**E-mail:** koynov\_rs@mail.ru

Поступила в редакцию 06.07.2020

После доработки 26.10.2020

Принята к публикации 25.02.2021

Received 06.07.2020

Revised 26.10.2020

Accepted 25.02.2021



## К юбилею Валерия Павловича Мешалкина



31 августа 2021 г. исполняется 80 лет Валерию Павловичу Мешалкину – директору Международного института логистики ресурсосбережения и технологической инноватики, заведующему кафедрой логистики и экономической информатики РХТУ им. Д.И. Менделеева, главному научному сотруднику Института общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова.

В.П. Мешалкин – академик РАН, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ и заслуженный работник высшей школы РФ, лауреат премий Правительства РФ в области науки и техники и Президента РФ в области образования, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, ведущий ученый в области анализа и синтеза высоконадежных энергоресурсосберегающих химико-технологических систем (ХТС); методов расчета и управления эксплуатацией малоотходных производств с оптимальными удельными расходами сырья, энергии, воды и конструкционных материалов; методов логистики ресурсосбережения и принципов управления «зелеными» цепями поставок предприятий нефтегазохимического комплекса (НГХК); методов компьютерной оценки воздействия на окружающую среду и управления рисками на предприятиях и в цепях поставок НГХК.

Валерий Павлович Мешалкин является основателем нового научного направления – теоретические основы

инжиниринга, обеспечения надежности и логистического управления энергоресурсоэффективностью ХТС производства высококачественной продукции.

В.П. Мешалкин с отличием окончил в 1964 г. Московский энергетический институт (МЭИ) и с ноября 1964 г. по ноябрь 1968 г. работал инженером по автоматизированным системам сбора и переработки бортовой космической информации в Особом конструкторском бюро МЭИ. В ноябре 1968 г. поступил в аспирантуру на кафедру кибернетики химико-технологических процессов МХТИ им. Д.И. Менделеева, и с тех пор вся его жизнь тесно связана с Менделеевкой. Валерий Павлович прошел путь от аспиранта до директора Международного института логистики ресурсосбережения и технологической инноватики РХТУ, работая в разных должностях: ассистент, доцент, профессор, заведующий кафедрой, директор.

Являясь учеником академика РАН В.В. Кафарова, начал активно развивать работы в области системного анализа химических производств, принципов и методов автоматизированного синтеза ресурсосберегающих ХТС. Эти работы легли в основу новых научных направлений: декомпозиционно-поисковые, эвристическо-эволюционные и термодинамические методы автоматизированного синтеза оптимальных технологических схем ресурсоэнергосберегающих неоднородных ХТС, теплообменных систем, систем ректификации и водопотребляющих подсистем ХТС; способы повышения ресурсоэнергоэффективности ХТС и минимизации отходов в ХТС; новые конструкции ресурсоэнергоэффективных струйно-вихревых тепло-массообменных и химических аппаратов; математические модели процессов кристаллизации металлических расплавов; физико-математический анализ текстуры и прогнозирования свойств композиционных материалов; компьютерное моделирование и текстурно-фрактальный анализ нестационарных потоков; анализ и оптимизация показателей надежности ХТС; принципы построения моделей представления неформализованных знаний и экспертных систем в химической технологии; принципы логистики ресурсоэнергосбережения в промышленности; методы интеллектуального ситуационного управления ресурсосберегающими ХТС и магистральными трубопроводами; эколого-экономическая оптимизация химических предприятий и корпоративных «зеленых» цепей поставок химической продукции; компьютерное моделирование экологических систем.

С конца 1990-х годов совместно с академиком П.Д. Саркисовым В.П. Мешалкин начал активно развивать новое научное направление – физико-химические и термодинамические принципы целенаправленного формирования и физико-математический анализ текстуры композиционных неорганических материалов.

Многие исследования В.П. Мешалкин осуществляет в тесном контакте с такими промышленными предприятиями, как ОАО «Башкирская нефтехимическая компания», ОХК «Щекиноазот», ОАО «ВНИИГаз», ПАО «Газпромнефть», ГУП «БашНИИНефтемаш» а также с учеными университетов Англии, Испании, Италии, Германии, Венгрии и Китая.

В.П. Мешалкин и его ученики разработали малоотходные технологические схемы и программно-математическое обеспечение оптимального управления эксплуатацией и надежностью производств капролактама, ментола, карбамида, слабой азотной и серной кислот; аммиака и азотных удобрений; хлора и каустической соды; высокооктановых бензинов, минеральных масел и продуктов первичной нефтепереработки.

Валерий Павлович ведет активную научно-организационную работу. Он – член бюро Отделения химии и наук о материалах РАН; член бюро Научного совета РАН по глобальным экологическим проблемам; член Правления и председатель секции «Компьютерная химическая технология» РХО им. Д.И. Менделеева; член Научно-технического совета Федеральной службы по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор) и председатель секции «Технологии переработки, утилизации и захоронения отходов». С 2001 г. заместитель председателя, председатель диссертационных советов по специальностям «Системный анализ, управление и обработка информации», «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», «Экономика и управление народным хозяйством», «Экология», «Пожарная и промышленная безопасность».

В.П. Мешалкин является заместителем главного редактора журнала «Теоретические основы химической технологии»; приглашенный редактор журнала «Energies» (издательство «Molecular Diversity Preservation International», Switzerland); член редакционного совета журнала: «Все материалы. Энциклопедический справочник»; член редколлегии журналов «Химическая технология», «Известия вузов. Черная металлургия», «Химическая промышленность сегодня», «Нефтехимия», «Нефтегазохимия», «Прикладная информатика», «Математические методы в технике и технологиях», «Менеджмент в России и за рубежом». Научный руководитель секций «Процессы и аппараты химических производств. Методы кибернетики в химической технологии», «Энергоресурсоэффективность, экологическая безопасность и управление рисками химических производств» XX и XXI Менделеевских

съездов по общей и прикладной химии (Екатеринбург, 2016; Санкт-Петербург, 2019).

Многие годы В.П. Мешалкин активно работал в системе государственной аттестации научных кадров высшей квалификации, являясь с 1985 г. членом, а затем заместителем председателя экспертных советов Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки по химической технологии и неорганической химии.

В.П. Мешалкин не только крупный ученый, но и талантливый преподаватель. Им разработаны и читаются оригинальные курсы лекций «Анализ и синтез ХТС», «Надежность и эффективность ХТС», «Гибридные экспертные системы в химической технологии», «Дискретная математика для химиков-технологов», «Теоретические основы логистики», «Управление цепями поставок», «Теория организации».

Коллектив ученых, руководимый В.П. Мешалкиным, получил признание в России и за ее пределами. Валерий Павлович руководил российскими группами четырех Трансъевропейских проектов по программам «TEMPUS-TACIS» и «INCOCOPERNICUS», неоднократно выступал с докладами на международных научных конференциях в США, Канаде, Китае, ФРГ, Франции, Италии, Греции, Турции, Чехии и Венгрии. В 1998 г. прошел научную стажировку в Великобритании, работал в Университете Южного берега (Лондон), Ноттингемском университете и Эдинбургском университете (Шотландия) и с тех пор неоднократно выезжал в служебные командировки в университеты и компании Италии, Германии, Великобритании, США, Испании, Ирландии, Турции, Венгрии, Чехии и Китая.

В 2006 г. В.П. Мешалкин избран членом-корреспондентом РАН по специальности «Химические технологии», а в 2016 г. – академиком РАН по специальности «Химические технологии» по Отделению химии и наук о материалах РАН.

В.П. Мешалкин – автор более 1200 научных трудов, в том числе 87 книг (включая 4 монографии), 30 патентов и авторских свидетельств, 25 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Под его руководством подготовлено 14 докторов наук и более 100 кандидатов наук.

Валерий Павлович награжден Почетной грамотой Президента РФ, нагрудным знаком «Почетный работник высшего образования России», знаком «Почетный работник науки и техники Российской Федерации». В 2018 г. стал победителем первого Всероссийского конкурса «Золотые имена высшей школы».

*Редакционная коллегия и редакция журнала «Известия вузов. Черная металлургия» от всего сердца поздравляют Валерия Павловича с юбилеем, желают ему крепкого здоровья, дальнейших успехов в реализации творческих планов в научной и педагогической деятельности.*

---

# XXII Международная научно-практическая конференция «МЕТАЛЛУРГИЯ: ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО» «МЕТАЛЛУРГИЯ–2021»

10–11 ноября 2021 г.

**Место проведения:** Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42

**Тел.:** +7 (3843) 46-26-29      **E-mail:** [onti@sibsiu.ru](mailto:onti@sibsiu.ru)

<http://www.sibsiu.ru/nauka-i-innovacii/konferentsii-seminary-vystavki/metallurgiya/>

## ЦЕЛЬ КОНФЕРЕНЦИИ

Высокопрофессиональное обсуждение новейших результатов исследований и технологических решений в области производства и обработки материалов, материаловедения, энерго- и ресурсосбережения, экологии и утилизации промышленных отходов.

Определение доминирующих тенденций и обоснование прогнозов и перспектив развития современной металлургии.

## СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ

1. Фундаментальные исследования, теория, моделирование и наукоемкие технологии металлургических процессов.
2. Фундаментальные исследования, теория и технология обработки металлических материалов: литейное производство, обработка давлением, термическая обработка.
3. Теория и технология процессов сварки, порошковой металлургии и получения композиционных материалов и покрытий.
4. Тепло- и массоперенос в металлургических процессах и агрегатах. Ресурсо- и энергосбережение, экология и утилизация отходов, охрана труда.
5. Автоматизация металлургических процессов.
6. Инновационные металлургические технологии в машиностроении.
7. Экономико-управленческие проблемы металлургических регионов.

## ОРГАНИЗАТОРЫ

- Администрация Правительства Кузбасса
- ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»
- АО «ЕВРАЗ ЗСМК»
- АО «РУСАЛ-Новокузнецк»
- АО «Кузнецкие ферросплавы»
- АО «НЗРМК им. Н.Е. Крюкова»
- Ляонинский университет науки и технологии, г. Аньшань, КНР

## ПАРТНЕРЫ

- ОАО «Черметинформация»
- Издательство Сибирского отделения РАН
- Журнал «Известия вузов. Черная металлургия»
- Журнал «Вестник СибГИУ»
- Журнал «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering»
- Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»
- АО «Кузбасский технопарк»
- Западно-Сибирское отделение РАЕН
- Совет молодых ученых Кузбасса

К началу конференции будет издан сборник научных докладов (индексируется в базе данных РИНЦ, размещается в электронной библиотеке <http://www.elibrary.ru>).

Рекомендованные организационным комитетом материалы конференции будут направлены для публикации в журналах «Известия вузов. Черная металлургия» и «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering», индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science.

Заявки и доклады необходимо направить до 10 сентября 2021 г. в электронном варианте с темой письма «Металлургия-2021» по адресу [onti@sibsiu.ru](mailto:onti@sibsiu.ru).

Над номером работали:

*Леонтьев Л.И., главный редактор*

*Протопопов Е.В., заместитель главного редактора*

*Ивани Е.А., заместитель главного редактора*

*Бащенко Л.П., заместитель ответственного секретаря*

*Потапова Е.Ю., заместитель главного редактора по развитию*

*Запольская Е.М., ведущий редактор*

*Киселева Н.Н., ведущий редактор*

*Расенец В.В., верстка, иллюстрации*

*Острогорская Г.Ю., менеджер по работе с клиентами*

---

Подписано в печать 26.07.2021. Формат 60×90 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бум. офсетная № 1.  
Печать цифровая. Усл. печ. л. 9,25. Заказ 13271. Цена свободная.

---

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСиС.  
119049, г. Москва, Ленинский пр-т, 4.  
Тел./факс: (499) 236-76-17

# IZVESTIYA

## FERROUS METALLURGY

HYDROGEN REMOVAL IN CIRCULATING VACUUM DEGASSER UNDER CONDITIONS OF PJSC "NLMK"

STRESS-STRAIN STATE OF METAL AT THE INITIAL STAGE OF RAILWAY RAILS ROLLING

INFLUENCE OF FERROUS METALLURGY ENTERPRISES ON ATMOSPHERIC AIR QUALITY AS AN ECOLOGICAL COMPONENT OF TERRITORIES SUSTAINABLE DEVELOPMENT. REPORT 2

INFLUENCE OF DEFORMATION DEGREE OF AUSTENITIC STEELS WELDED JOINTS ON STRUCTURAL STATE AND INTERNAL STRESSES FIELDS IN WELD LINE ZONE

DIRECT MICROALLOYING OF STEEL WITH CERIUM UNDER SLAGS OF  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-15 \% Al}_2\text{O}_3\text{-8 \% MgO}$  SYSTEM WITH ADDITIONAL REDUCING AGENTS

DIGITAL TRANSFORMATION OF PYROMETALLURGICAL TECHNOLOGIES: STATE, SCIENTIFIC PROBLEMS AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT

GENERATION OF INCREASED MECHANICAL PROPERTIES OF CANTOR HIGH-ENTROPY ALLOY

DEVELOPMENT OF A SET OF REGULATORY MODELS FOR METALLURGICAL ENTERPRISE DIVISIONS FUNCTIONING

TO THE 80<sup>TH</sup> ANNIVERSARY OF VALERII PAVLOVICH MESHALKIN