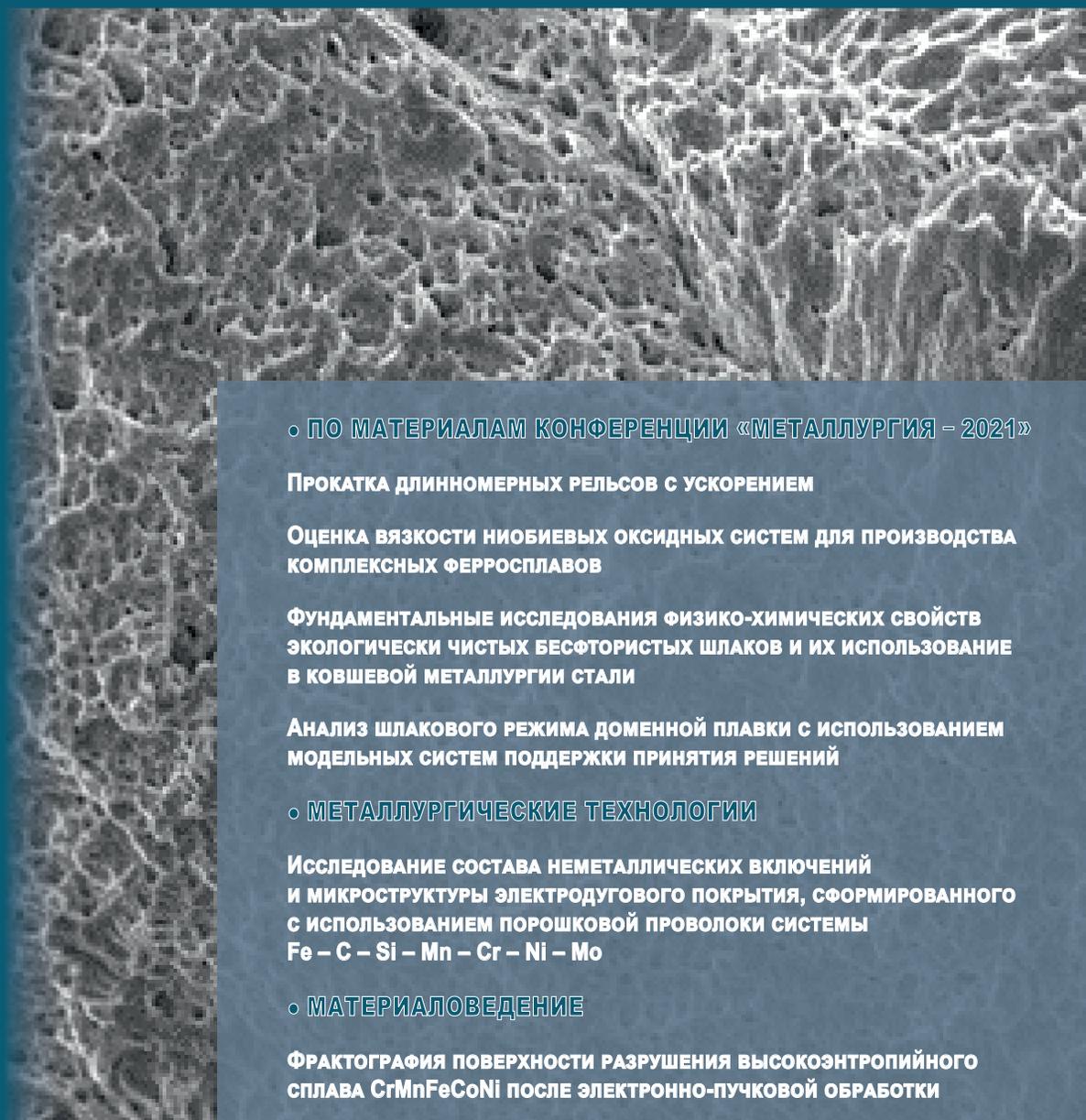


# ИЗВЕСТИЯ

## ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

### ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 65 Номер 6 2022



◦ ПО МАТЕРИАЛАМ КОНФЕРЕНЦИИ «МЕТАЛЛУРГИЯ – 2021»

**ПРОКАТКА ДЛИННОМЕРНЫХ РЕЛЬСОВ С УСКОРЕНИЕМ**

**Оценка вязкости ниобиевых оксидных систем для производства комплексных ферросплавов**

**Фундаментальные исследования физико-химических свойств экологически чистых бесфтористых шлаков и их использование в ковшевой металлургии стали**

**Анализ шлакового режима доменной плавки с использованием модельных систем поддержки принятия решений**

◦ **МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**Исследование состава неметаллических включений и микроструктуры электродугового покрытия, сформированного с использованием порошковой проволоки системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo**

◦ **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

**ФРАКТОГРАФИЯ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА CrMnFeCoNi после электронно-пучковой обработки**



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

# ИЗВЕСТИЯ

## ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

### ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

*Том 65, Номер 6, 2022*

Научно-технический журнал  
Издается с января 1958 г. ежемесячно

# IZVESTIYA

## FERROUS METALLURGY

*Volume 65, Number 6, 2022*

Scientific and Technical Journal  
Published since January 1958. Issued monthly

# 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@sis.ru

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

### Редакционная коллегия:

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

**Горбатько 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

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

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

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

**Мешалкин В.П.**, академик РАН, д.т.н., профессор, 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

**Нурмгалиев 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

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

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

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

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

**Смирнов Л.А.**, академик РАН, д.т.н., профессор, 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

**Шешуков 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: redjivzv@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

**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

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

**Il'ya 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**, Academician of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, Volgograd State Technical University, Volgograd

**Valerii P. Meshalkin**, Dr. Sci. (Eng.), Academician of RAS, Prof., D.I. Mendeleyev 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

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

**Andrei I. Rudskoi**, Academician of RAS, 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

XXII Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество». г. Новокузнецк, 10 – 11 ноября 2021 г. («Металлургия – 2021») ..... 380

22<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference “Metallurgy: Technologies, Innovations, Quality”. Novokuznetsk, November 10 – 11, 2021 (“Metallurgy – 2021”) ... 380

ПО МАТЕРИАЛАМ КОНФЕРЕНЦИИ  
«МЕТАЛЛУРГИЯ – 2021»

BASED ON THE MATERIALS  
OF THE CONFERENCE “METALLURGY – 2021”

Соловьев В.Н., Белолипецкая Е.С. Прокатка длинномерных рельсов с ускорением ..... 381  
Черникова О.П., Златицкая Ю.А. Ресурсоэффективность металлургического производства ..... 390  
Заякин О.В., Шартдинов Р.Р., Сметанников А.Н., Кель И.Н. Оценка вязкости ниобиевых оксидных систем для производства комплексных ферросплавов ..... 399  
Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Протопопов Е.В., Уполонникова А.Г., Сметанников А.Н. Фундаментальные исследования физико-химических свойств экологически чистых бесфтористых шлаков и их использование в ковшевой металлургии стали ..... 406  
Павлов А.В., Спириин Н.А., Бегинюк В.А., Лавров В.В., Гуриин И.А. Анализ шлакового режима доменной плавки с использованием модельных систем поддержки принятия решений ..... 413

Solov'ev V.N., Belolipetskaya E.S. Rolling of long-length rails with acceleration ..... 381  
Chernikova O.P., Zlatitskaya Yu.A. Resource efficiency of metallurgical production ..... 390  
Zayakin O.V., Shartdinov R.R., Smetannikov A.N., Kel' I.N. Viscosity of niobium oxide systems for production of complex ferroalloys ..... 399  
Babenko A.A., Smirnov L.A., Protopopov E.V., Upolonnikova A.G., Smetannikov A.N. Fundamental studies of physicochemical properties of environmentally friendly fluorine-free slags and their use in ladle steel industry ..... 406  
Pavlov A.V., Spirin N.A., Beginyuk V.A., Lavrov V.V., Gurin I.A. Analysis of slag mode of blast furnace melting using model decision support systems ..... 413

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

Козырев Н.А., Осетковский И.В., Усольцев А.А., Полевой Е.В., Михно А.Р. Исследование состава неметаллических включений и микроструктуры электродугового покрытия, сформированного с использованием порошковой проволоки системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo ..... 421

Kozyrev N.A., Osetkovskii I.V., Usol'tsev A.A., Polevoi E.V., Mikhno A.R. Composition of non-metallic inclusions and microstructure of electric arc coating formed using the flux-cored wire of Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo system ..... 421

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

MATERIAL SCIENCE

Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Осинцев К.А., Воробьев С.В., Панченко И.А. Фрактография поверхности разрушения высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi после электронно-пучковой обработки ..... 427

Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A., Vorob'ev S.V., Panchenko I.A. Fractography of fracture surface of CrMnFeCoNi high-entropy alloy after electron-beam processing ..... 427

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ  
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ  
ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ  
И МАТЕРИАЛАХ

INNOVATIONS IN METALLURGICAL  
INDUSTRIAL AND LABORATORY  
EQUIPMENT, TECHNOLOGIES  
AND MATERIALS

Никитин А.Г., Баженов И.А., Герасимов С.П. Анализ эксплуатационного ресурса привода волочильного стана ..... 434

Nikitin A.G., Bazhenov I.A., Gerasimov S.P. Analysis of the drawing mill drive operation ..... 434

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
И АВТОМАТИЗАЦИЯ  
В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

**Кулаков С.М., Койнов Р.С., Ляховец М.В., Тараборина Е.Н.** Автоматизированное управление сложными металлургическими агрегатами на основе метода прецедентов ..... 437

**Памяти Михаила Васильевича Астахова** ..... 447  
**Подгородецкий Геннадий Станиславович (23.01.1958 – 21.06.2022)** ..... 448

**INFORMATION TECHNOLOGIES  
AND AUTOMATIC CONTROL  
IN FERROUS METALLURGY**

**Kulakov S.M., Koinov R.S., Lyakhovets M.V., Taraborina E.N.** Automated control of complex metallurgical units based on the CBR method ..... 437

**In memory of Mikhail Vasil'evich Astakhov** ..... 447  
**Podgorodetskii Gennadii Stanislavovich (23.01.1958 – 21.06.2022)** ..... 448

---

## XXII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «МЕТАЛЛУРГИЯ: ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО». г. НОВОКУЗНЕЦК, 10 – 11 НОЯБРЯ 2021 г. («МЕТАЛЛУРГИЯ – 2021»)



10 – 11 ноября 2021 г. в Сибирском государственном индустриальном университете состоялась традиционная XXII Международная научно-практическая конференция «Металлургия: технологии, инновации, качество» (Металлургия – 2021). Конференция была посвящена 100-летию со дня рождения бывшего ректора университета д.т.н., профессора Н.В. Толстогузова, внесшего значительный вклад в развитие вуза.

Председателем программного комитета конференции стал академик РАН, д.т.н., профессор, научный руководитель УРИМЕТ Л.А. Смирнов (г. Екатеринбург), председателем Оргкомитета – д.т.н., доцент, ректор СибГИУ А.Б. Юрьев (г. Новокузнецк).

На конференции обсуждались наиболее важные и интересные результаты исследований современной металлургической науки с целью создания единого научно-технического и информационного пространства, формирования базовых направлений научного поиска в вузах, отраслевых предприятиях и организациях, принявших участие в научном форуме.

В работе конференции приняли участие известные ученые – металлурги и ведущие специалисты промышленных предприятий России, Китая, Германии, Бразилии, Казахстана, Таджикистана,

Азербайджана, Беларуси, Канады, Индии, представляющие более 50 образовательных и научных организаций, промышленных предприятий из 30 городов России и зарубежья, направивших в адрес организационного комитета 120 докладов по 7 секциям.

Двухтомный сборник трудов конференции включает доклады по актуальным вопросам теории и наукоемким технологиям металлургических процессов, обработки металлических материалов, процессов сварки, порошковой металлургии, получения композиционных материалов и покрытий, тепло- и массопереноса в металлургических процессах и агрегатах, ресурс- и энергосбережения, автоматизации, инновационных металлургических технологий в машиностроении, экономико-управленческих проблем металлургических регионов.

Редакция журнала в этом и следующих номерах публикует наиболее интересные доклады, рекомендованные Оргкомитетом, в которых определяются доминирующие современные тенденции в области металлургии и обосновываются прогнозы на перспективу.

*Ректор СибГИУ, д.т.н.  
А. Б. Юрьев*



Оригинальная статья

УДК 621.71

DOI 10.17073/0368-0797-2022-6-381-389

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2318>



## ПРОКАТКА ДЛИННОМЕРНЫХ РЕЛЬСОВ С УСКОРЕНИЕМ

В. Н. Соловьев, Е. С. Белолипецкая

Липецкий государственный технический университет (Россия, 398055, Липецк, ул. Московская, 30)

**Аннотация.** В статье рассматривается новый температурно-скоростной режим прокатки длинномерных рельсов. Рельсы длиной до 50 м прокатывали на линейных станах. Производство рельсов большей длины потребовало использования заготовок большей массы и оборудования новой конструкции. На современных рельсобалочных станах количество клетей увеличено, часть клетей объединена в непрерывную группу, универсальные клетки стали применять не только в качестве калибрующих. Рельсы длиной 100 м прокатывают из заготовок большой массы на станах с непрерывной реверсивной группой универсальных клетей. Существенная длина заготовки приводит к образованию «температурного клина» – снижению температуры по длине рельсов во время прокатки в последней клетке стана. Расчет показан, что снижение температуры по длине рельсов может приводить к увеличению их высоты. Аналогичная проблема существует и при производстве тонкого листового проката на непрерывном широкополосном стане горячей прокатки. Прокатка раската в чистовой группе клетей с ускорением позволяет сократить время остывания заднего участка раската и разогреть металл за счет более интенсивной деформации. Ускорение выбирается таким, чтобы на выходе из чистовой группы клетей температура полосы была одинаковой по всей длине. В настоящей работе предлагается прокатка рельсов с ускорением, которое должно обеспечивать одинаковую температуру шейки по длине рельсов в последней клетке стана, что снизит разность высоты по длине проката. Одинаковая высота рельсов по длине уменьшит затраты на шлифовку и ускорит монтаж, тем самым повысит потребительский спрос и конкурентоспособность рельсов.

**Ключевые слова:** длинномерные рельсы, реверсивная группа прокатных клетей, ускорение, температурный клин, высота рельсов

**Для цитирования:** Соловьев В.Н., Белолипецкая Е.С. Прокатка длинномерных рельсов с ускорением // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 6. С. 381–389. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-381-389>

Original article

## ROLLING OF LONG-LENGTH RAILS WITH ACCELERATION

V. N. Solov'ev, E. S. Belolipetskaya

Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya Str., Lipetsk 398055, Russian Federation)

**Abstract.** The article explains a new temperature-speed mode of rolling long-length rails. Rails up to 50 m long were rolled on linear mills. The production of rails of longer length required the use of larger mass billets and equipment of a new design. At the modern rail-beam rolling mill, the number of stands has increased and some of the stands are combined into a continuous group. Universal rolling stands began to be used not only as calibration stands. Rails with a length of 100 m are rolled from large-mass billets on mills with a continuous reversible group of universal stands. A significant length of the billet leads to the formation of a «temperature wedge» – a decrease in temperature along the length of the rail during rolling in the last stand of the mill. The calculation showed that a decrease in temperature along the rail length can lead to an increase in its height. A similar problem existed in the production of thin sheet metal at continuous broadband hot rolling mill. Rolling the rolled metal in the finishing group of stands with acceleration made it possible to reduce the cooling time of rear section of the rolled metal and warm up the metal due to more intense deformation. The acceleration value is chosen such that at the exit from the finishing group of stands, temperature of the strip is the same along the length of the strip. In this paper, rolling rails with acceleration is proposed. The acceleration value should ensure the same neck temperature along the length of the rail in the mill last stand, which will reduce the height difference along the length of the rolled product. The same rails height along the length will reduce the cost of grinding and accelerate the rail laying, thereby increasing consumer demand and competitiveness of the product.

**Keywords:** long-length rails, continuously reversible group of rolling stands, acceleration, temperature wedge, rail height

**For citation:** Solov'ev V.N., Belolipetskaya E.S. Rolling of long-length rails with acceleration. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 6, pp. 381–389. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-381-389>

### ВВЕДЕНИЕ

Основу железнодорожной сети России составляют рельсы Р65. Рельсы длиной 12,5 и 25,0 м производятся на станах линейного типа. Например, рельсобалочный

стан 900/800 состоит из четырех двух- и трехвалковых клетей, расположенных в три линии. Масса заготовки составляет около 3,5 т. Из заготовки получают прокат длиной до 50 м, который затем разделяют пилами на рельсы требуемой длины [1].

Для производства рельсов длиной 100 м и более требуется заготовка большей массы. Длительность прокатки возрастает, что не позволяет получать требуемую температуру конца прокатки. Рельсы длиной 100 м прокатывают на станах с непрерывной группой клетей [2], которая сокращает пространство, занимаемое оборудованием стана, снижает потери тепла заготовки во время прокатки, что позволяет обеспечить требуемую температуру конца прокатки. В состав стана входит шесть клетей: черновая обжимная клеть; обжимная клеть; непрерывная реверсивная группа из трех клетей и калибровочная клеть<sup>1</sup> [3, 4].

На стане с непрерывной группой клетей обеспечиваются температурные режимы прокатки рельсов [5]. Черновую прокатку проводят в температурном интервале 950–1100 °С с коэффициентом вытяжки за проход в пределах 1,12–1,30. Чистовую прокатку проводят в температурном интервале 850–1000 °С с коэффициентом вытяжки в универсальных калибрах в пределах 1,07–1,18. Далее проводят финишную прокатку в отдельно стоящей универсальной нереверсивной калибровочной клетей в температурном интервале 820–880 °С с коэффициентом вытяжки в пределах 1,07–1,10 [6]. Затем осуществляют дифференцированное охлаждение по головке и подошве рельсов от 720–870 до 450–600 °С [7–9]. В результате получают рельсы повышенной износостойкости и контактной выносливости [10–12].

Финишную прокатку в отдельно стоящей универсальной нереверсивной калибровочной клетей проводят для соблюдения прямолинейности и обеспечения требуемых геометрических размеров профиля рельсов по всей их длине в заданном диапазоне допусков.

Прокатка длинномерных рельсов в непрерывной группе клетей имеет свои особенности. Деформация происходит в универсальной клетей, что обуславливает сложности формировании сечения в коробчатых закрытых несимметричных рельсовых калибрах [13–15].

<sup>1</sup> SMS-group. LONG PRODUCTS BULLETIN. EDITION. 2016. URL: <https://www.sms-group.com/press-media/media/downloads/download-detail/download/15926> (Дата обращения: 21.12.2021).

Следует учитывать влияние соседних клетей и деформации в универсальной клетей. Важно обеспечить температуру конца прокатки в заданном интервале по всей длине рельсов.

### ОБРАЗОВАНИЕ РАЗНОСТИ ВЫСОТЫ ДЛИННОМЕРНЫХ РЕЛЬСОВ ПРИ ПРОКАТКЕ В НЕПРЕРЫВНОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ

В качестве примера современного стана по производству рельсов большой длины рассмотрим рельсовый стан компании АО «ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат» (ЕВРАЗ ЗСМК), который является одним из крупнейших производителей всей номенклатуры рельсового сортамента не только в России, но и в мире. Основным поставщиком рельсовой продукции для ОАО «Российские железные дороги» является АО «ЕВРАЗ ЗСМК» [16, 17]. После реконструкции в одном цехе производятся все виды рельсов: магистральные, трамвайные, подкрановые, остряковые, для метрополитена. Также возможности нового прокатного стана позволяют производить продукцию строительного сортамента: балки, швеллеры, шпунты, квадратную и круглую заготовки.

На АО «ЕВРАЗ ЗСМК» выпускаются рельсы железнодорожные широкой колеи Р65 дифференцированно термоупрочненные с прокатного нагрева длиной 12,5, 25,0 и 100,0 м, рельсы категории ДТ350СС – рельсы с улучшенными геометрическими параметрами для движения поездов со скоростью до 250 км/ч [18].

Состав оборудования стана включает обжимную и черновую клетей, непрерывную реверсивную трехклетевую группу клетей и чистовую универсальную клетей. В состав непрерывной группы входят две универсальные клетей (рис. 1, где *I* – реверсивная обжимная клетей; *II* – черновая реверсивная клетей; *III* – непрерывная реверсивная группа клетей; *IV* – калибровочная нереверсивная клетей; УК1 – первая универсальная клетей; ВК – вспомогательная клетей; УК2 – вторая универсальная клетей; УКЗК – универсальная калибровочная клетей) [16]. Последняя клетей стана используется как калибровочная.

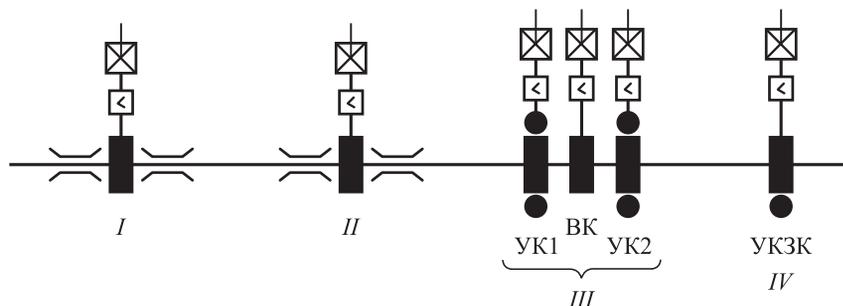


Рис. 1. Последовательность расположения прокатных клетей рельсобалочного стана

Fig. 1. Sequence of rolling stands of the rolling mill

На валках обжимной клетки BD1 расположены три тавровых калибра, а также ящичные калибры для получения из исходной непрерывнолитой заготовки раската прямоугольного сечения, задаваемого в первый тавровый калибр. В черновой клетке BD2 проводится разрезка полученного таврового профиля в закрытом разрезном калибре и дальнейшая прокатка в закрытом рельсовом калибре, а далее в открытом рельсовом калибре с целью получения профиля симметричного относительно горизонтальной оси прокатки в универсальных клетях.

В непрерывной реверсивной группе клеток прокатка проводится за три прохода. В первом проходе используется универсальная клетка УК1 и вспомогательная клетка ВК, у которой на линии прокатки установлен черновой контрольный калибр для обжатия высоты фланцев, полученных в УК1. Клетка УК2 не участвует в прокатке: ее валки автоматически разводятся нажимным устройством, пропуская раскат без обжатия.

После реверса стана клетка ВК выводится с линии прокатки, во втором проходе раскат получает обжатие только в клетке УК1. В третьем проходе (после поджатия валков в клетках УК1 и УК2) используются все три клетки непрерывной группы, причем во вспомогательной клетке на линию прокатки устанавливается предчистовой контрольный калибр. Таким образом, раскат получает четыре прохода в универсальных клетях и два прохода в контрольных калибрах вспомогательной клетки. В клетке УК3К проводится за один проход горячее калибрование готового профиля, благодаря чему повышается точность и достигается стабилизация размеров рельсов по длине, устраняется малейшая несимметричность профиля и снижается расход металла.

Для высокоскоростных железных дорог требуются рельсы с высокой точностью геометрических размеров, для обеспечения которой на современных станах используются универсальные клетки не только в качестве последней чистовой клетки, но и как промежуточные.

Важным параметром является высота рельсов. Особенно это актуально для рельсов длиной 100 м. Рельсы большой длины служат основой бесстыкового пути и соединяются сваркой. Отклонения сварных стыков рельсов от прямолинейности в виде горбов по поверхности катания головки в вертикальной плоскости и по боковой рабочей грани головки в горизонтальной плоскости на длине 1 м после шлифования не должны превышать 0,2 мм для железнодорожных путей скоростного и высокоскоростного движения<sup>2</sup> [19 – 23].

При более высоком отклонении высоты на стыке при сваривании двух рельсов образуется небольшое возвышение, которое в процессе эксплуатации способ-

ствует появлению вмятины. Для того, чтобы устранить разность высоты, рельсы шлифуют в месте стыка после сварки. Если разность высоты присутствует на всех рельсах, то шлифовку приходится проводить на всех стыках, что требует больших затрат. Использование калибровочной клетки существенно снижает расход металла и затраты на строительство железных дорог.

На размеры готовой рельсовой продукции оказывает влияние не только точность и форма калибров, схема калибровки (последовательность деформации в калибрах), но и температурные условия получения размеров рельсов.

Прокатка основной части заготовки во всех клетях непрерывной реверсивной группы клеток ведется с постоянной скоростью. В частности, в начале третьего прохода передний конец раската проходит межклетевые промежутки с постоянной, заправочной скоростью прокатки, соответствующей моменту времени окончания разгона валков и начала захвата металла валками при частоте вращения валков  $n_{y1}, n_{y2}, n_{y3}$  (рис. 2, а, где  $n_{y1}, n_{y2}, n_{y3}$  – частота вращения валков в момент захвата раската;  $n_{n1}, n_{n2}, n_{n3}$  – частота вращения валков в период прокатки основной части раската;  $n_{s1}, n_{s2}, n_{s3}$  – частота вращения валков в момент выпуска раската;  $\tau_{p1}$  – время разгона валков клетки УК1 до скорости захвата;  $\tau_y$  – время разгона непрерывной группы клеток до рабочей скорости;  $\tau_{n1}$  и  $\tau_{ny1}$  – время прокатки основной части раската с постоянной скоростью и ускорением;  $\tau_3$  – время замедления непрерывной группы клеток до скорости выпуска раската;  $\tau_{zn1}$  – время прокатки раската с заправочной скоростью в клетке УК1;  $\tau_{m3}$  – время прокатки раската в клетке УК2 до момента выпуска раската из клетки УК1;  $\tau_{вп3}$  – время выпуска раската из непрерывной группы;  $\tau_{o3}$  – время торможения клетки УК2 до остановки;  $\tau_{ост}$  – время паузы на реверс клеток;  $T_3$  – время третьего прохода).

Разгон валков с раскатом до рабочей скорости начинается одновременно во всех трех клетях группы после того, как передний конец раската с заправочной скоростью пройдет все межклетевые промежутки и достигнет последней клетки. Скорости по клетям различаются пропорционально коэффициентам вытяжки раската в клетях.

При достижении рабочей скорости ( $n_{n1}, n_{n2}, n_{n3}$ ) по клетям прокатка основной части раската проводится с постоянной скоростью. Замедление валков с раскатом начинается одновременно во всех клетях группы после окончания прокатки с максимальной скоростью в первой клетке.

Во время прокатки металл раската остывает. Существенная длина заготовки для производства рельсов длиной 100 м приводит к образованию «температурного клина» – снижению температуры по длине рельсов во время прокатки в клетке УК3К.

Образование «температурного клина» обусловлено более длительным охлаждением заднего конца раската (по сравнению с передним) перед последним проходом.

<sup>2</sup> Положение о системе ведения рельсового хозяйства ОАО «РЖД». Утверждено распоряжением № 2334р ОАО «РЖД» от 31 октября 2013 г. URL: <https://mooml.com/d/otraslevye-i-vedomstvennye-normativno-metodicheskie-dokumenty/proektirovanie-i-stroitelstvo-zheleznikh-dorog/34228/> (Дата обращения: 07.11.2021).

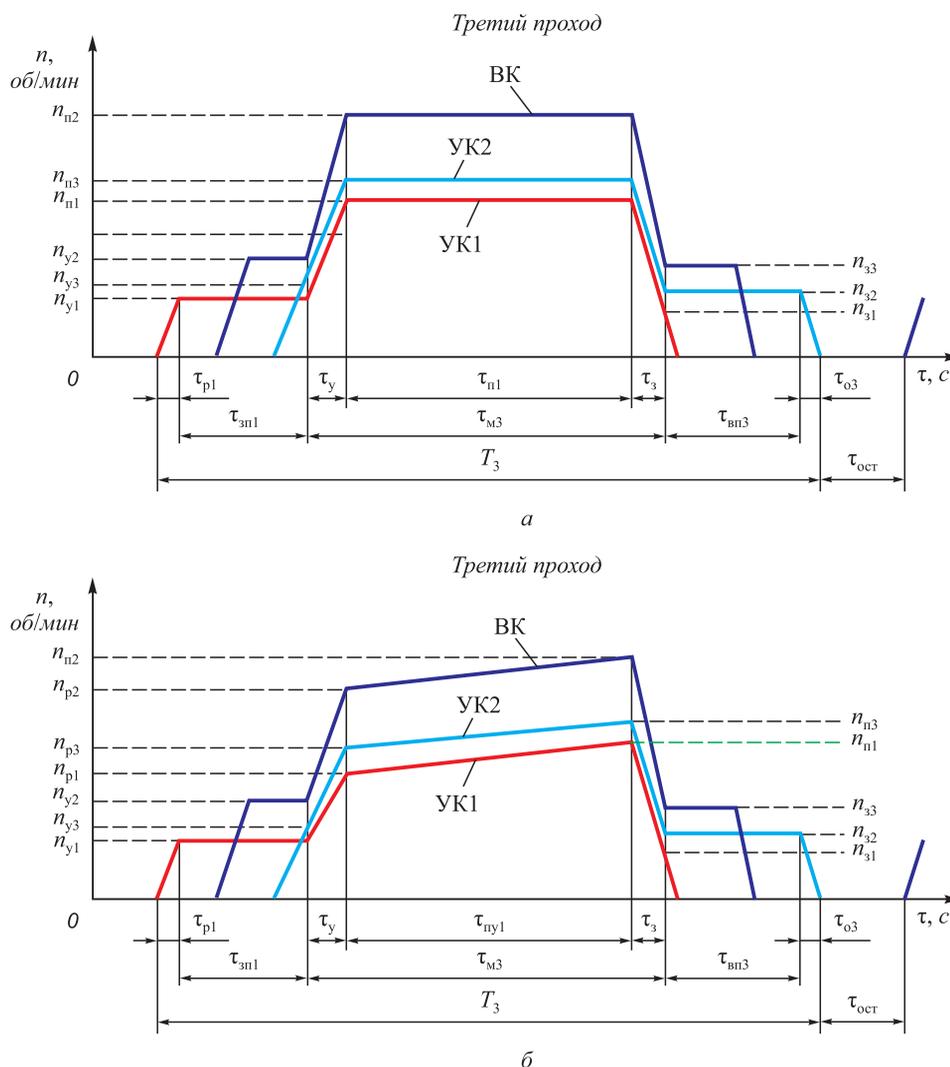


Рис. 2. Режим прокатки основной части рельса с постоянной скоростью (а) и с ускорением (б)

Fig. 2. Rolling mode of the rail main part at constant speed (a) and with acceleration (b)

Определение изменения температуры элементов рельсов по клетям стана проводится методами математического моделирования [24 – 27]. Расчет в разных сечениях позволяет оценить изменение температуры по длине проката (рис. 3). Для рассматриваемого состава оборудования и схемы прокатки рельсов различие температуры ( $\Delta T$ ) шейки по длине проката может составлять 75 °С в калибровочной клетке.

Образующаяся разность температур раската сохраняется и на готовой продукции. Следовательно, в калибровочной клетке получаем одинаковый размер, но при разных температурах. При охлаждении переднего и заднего концов раската разность температур может приводить к образованию разности высоты рельсов.

Определим разность высоты по длине по разности температур шейки, так как основную долю в высоте составляет шейка рельсов. Рельсы для высокоскоростных железных дорог производятся из стали марки 76ХФ, коэффициент теплового расширения  $\alpha$  составляет  $14,8 \cdot 10^6$  1/°С [28]. Высота  $H$  рельсов Р65 составляет

180 мм [29]. Разность высоты шейки по длине рельсов составит [30]:

$$\Delta H = \alpha \Delta T = 180 \cdot 14,8 \cdot 10^6 \cdot 75 = 0,1998 \text{ мм.}$$

Разность высоты переднего и заднего концов рельсов близка к предельно допустимой 0,2 мм. Следует стремиться к устранению разности высоты по длине; получение одинаковой высоты профиля по длине позволит:

- уменьшить затраты на шлифовку стыков;
- ускорить монтаж рельсового пути;
- повысить потребительский спрос и конкурентоспособность рельсов длиной 100 м для высокоскоростных железных дорог.

Для устранения разности высоты по длине рельсов необходимо исключить разность температуры по длине. Иными словами, нужно изменить технологию прокатки так, чтобы температура на всех участках рельсов по длине была одинакова для повышения точности размеров.

### МЕТОД УСТРАНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО КЛИНА

Аналогичная проблема существует и при производстве листового проката. Для устранения температурного клина используется прокатка с ускорением в чистой непрерывной группе клетей при прокатке слябов большой массы [31, 32]. При этом сокращается время нахождения заднего конца раската на промежуточном рольганге и происходит разогрев металла из-за большей скорости деформации.

Например, в состав оборудования непрерывного широкополосного стана горячей прокатки полос 2000 ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (НЛМК) входит двенадцать клетей, разделенных на две группы: черновую и чистовую. Черновая включает пять последовательно расположенных клетей, а чистовая – семь клетей, образующих непрерывную группу. Черновая и чистовая группы клетей разделены промежуточным рольгангом, на котором уместается раскат.

На непрерывном широкополосном стане горячей прокатки (НШСГП) нагретый в печах сляб прокатыва-

ют в черновой группе клетей до промежуточной толщины раската и транспортируют его к чистой непрерывной группе по промежуточному рольгангу. Затем раскат задают в чистовую группу клетей, где обжимают в полосу заданной толщины [33]. Прокатанная полоса по отводящему рольгангу транспортируется к группе моталок, где сматывается в рулон.

При движении по промежуточному рольгангу раскат остывает. Причем задний конец полосы остывает дольше, чем передний, что приводит к уменьшению температуры конца прокатки от переднего конца к заднему по длине полосы [34 – 37]. Такое снижение температуры конца прокатки по длине полосы от переднего к заднему концу принято называть «температурным клином», для устранения которого используется прокатка с ускорением в чистой непрерывной группе клетей при прокатке слябов большой массы. При этом сокращается время нахождения заднего конца раската на промежуточном рольганге и происходит разогрев металла из-за большей скорости деформации. При производстве тонких полос деформация по коэффициенту вытяжки находится в интервале от 7 до 10.

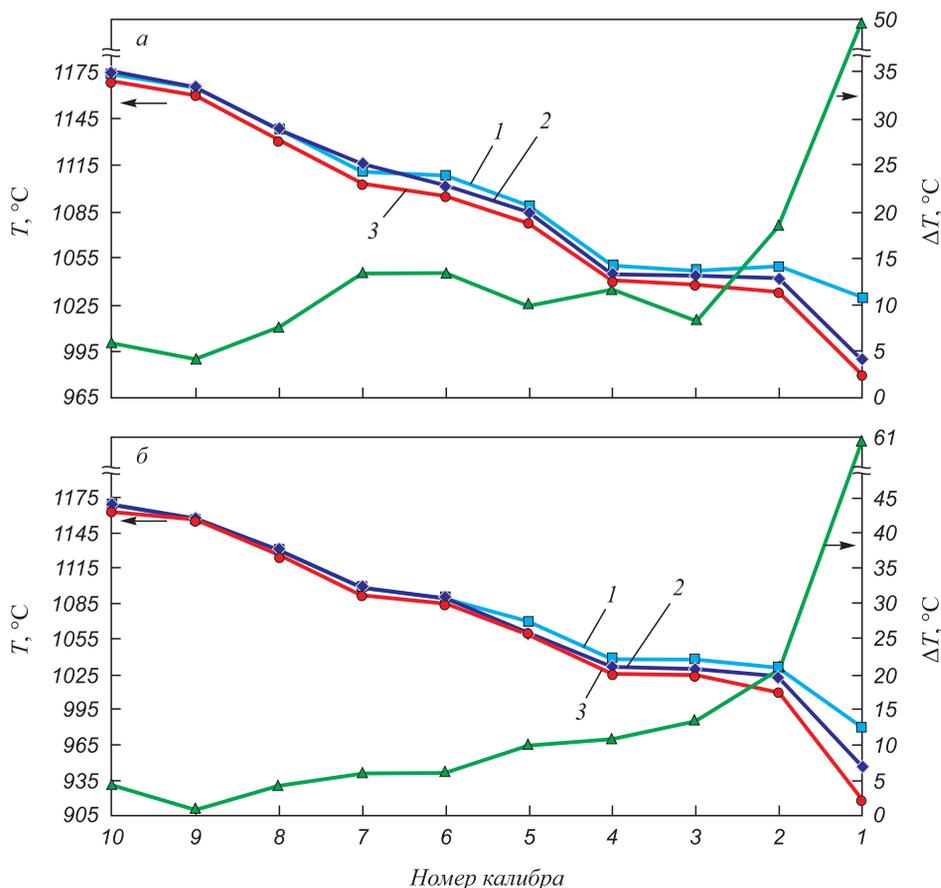


Рис. 3. Изменение среднemasовой температуры ( $\Delta T$ ) и температур элементов рельсового профиля в поперечных сечениях передней (а) и задней (б) частей раската:  
 1 – головка; 2 – подошва; 3 – шейка

Fig. 3. Change in the average mass temperature ( $\Delta T$ ) and temperatures of the rail profile elements in cross sections of the front (a) and rear (b) parts of the rolled metal:  
 1 – head; 2 – base; 3 – neck

Температуру конца прокатки поддерживают одинаковой по длине полосы во время прокатки. Вначале прокатку ведут с заправочной скоростью, обеспечивающей получение требуемой температуры конца прокатки на переднем конце полосы. После выхода переднего конца полосы из чистовой группы (или после заправки полосы в моталку) скорость прокатки постепенно увеличивается, обеспечивая постоянную по длине полосы температуру конца прокатки.

Прокатку с ускорением можно использовать и при производстве длинномерных рельсов: ускорение должно обеспечивать одинаковую температуру по длине рельсов в последней клетке стана. Однако прокатка рельсов с ускорением в непрерывной реверсивной группе клеток имеет существенное отличие от способа прокатки полос с ускорением в непрерывной группе клеток: невозможно получить одинаковую температуру по поперечному сечению изделия. Полоса в сечении представляет собой прямоугольник, температура по сечению которого примерно одинакова. Рельсы имеют сложное строение поперечного сечения. Рельсы в поперечном сечении состоят из трех элементов: головки, шейки и подошвы. Каждый элемент имеет разные размеры и охлаждается с разной скоростью, что делает получение одинаковой температуры в поперечном сечении невозможным. Кроме того, получение одинаковой температуры конца прокатки по длине полос происходит не только за счет сокращения времени нахождения заднего конца раската на промежуточном рольганге, но и разогрева металла из-за большей скорости деформации. Рельсы являются объемными, поэтому разогрев от деформации и снижение температуры элементов не могут быть одинаковыми. Именно поэтому термин «температура конца прокатки» для рельсов не применим без уточнения температуры конца прокатки шейки.

Технически прокатку с ускорением можно реализовать следующим образом (рис. 2, б, где  $n_{p1}$ ,  $n_{p2}$ ,  $n_{p3}$  – частота вращения валков в период начала прокатки основной части раската с ускорением). Вначале заполнение непрерывной группы проходит обычным образом. Передний конец раската проходит межклетевые промежутки с постоянной, заправочной скоростью прокатки, соответствующей моменту времени окончания разгона валков и начала захвата металла валками при частоте вращения  $n_{y1}$ ,  $n_{y2}$ ,  $n_{y3}$ . Разгон валков с раскатом до рабочей скорости начинается одновременно во всех клетях группы после того, как передний конец раската с заправочной скоростью пройдет все межклетевые промежутки и достигнет последней клетки. Скорости по клетям различаются пропорционально коэффициентам вытяжки раската в клетях.

В отличие от применяемого скоростного режима прокатки рабочая скорость  $n_{p1}$ ,  $n_{p2}$ ,  $n_{p3}$  меньше максимально возможной  $n_{п1}$ ,  $n_{п2}$ ,  $n_{п3}$ . От рабочей скорости до максимальной прокатка основной части раската проводится с ускорением, обеспечивающим по длине рельсов «обратный температурный клин» по температуре шейки (увеличение температуры по длине проката от переднего конца к заднему концу рельсов). Ускорение и рабочая скорость выбираются таким образом, чтобы к окончанию прокатки основной части раската скорость равнялась максимально возможной. Замедление валков с полосой до скорости выпуска раската  $n_{31}$ ,  $n_{32}$ ,  $n_{33}$  должно начинаться одновременно во всех клетях группы после окончания прокатки с максимальной скоростью в первой клетке.

Максимальная скорость прокатки определяется технической возможностью стана и условием обеспечения требуемой температуры конца прокатки рельсов. Ожидаемое ускорение на основе опыта прокатки толстых полос на НШСГП [39] составляет 0,005 – 0,010 м/с<sup>2</sup>. Обратный температурный клин должен обеспечивать одинаковую температуру шейки по длине рельсов (температуру конца прокатки) в калибровочной клетке для получения одинаковой высоты по длине.

Можно использовать (при технической возможности) прокатку с ускорением и в калибровочной клетке. Такая прокатка сократит время остывания заднего конца раската перед клетью и позволит уменьшить ускорение в последнем проходе в чистовой непрерывной реверсивной группе клеток. Режим прокатки рельсов с ускорением применим при различных схемах калибровки валков клеток и стана в целом.

## Выводы

Основная часть длины рельсов в непрерывной группе клеток рельсобалочного стана прокатывается с постоянной скоростью. При этом на входе в калибровочную клетку формируется «температурный клин», который приводит к образованию разности высоты переднего и заднего концов рельсов. Следует стремиться к устранению разности температуры по длине, что технически можно сделать за счет прокатки с ускорением в непрерывной группе клеток. Такая прокатка обеспечит одинаковую температуру шейки по длине в последней клетке стана. Можно использовать прокатку с ускорением и в калибровочной клетке. Получение рельсов с одинаковой по длине высотой профиля позволит уменьшить затраты на шлифовку стыков, ускорить монтаж рельсового пути, повысить потребительский спрос и конкурентоспособность рельсов.

1. Грудев А.П., Машкин Л.Ф., Ханин М.И. Технология прокатного производства. М.: Metallurgiya, 1994. 656 с.
2. Mauk P.J., Overhagen C., Stellmacher U. Development of rolling technology in the long products sector // *Stahl und Eisen*. 2010. Vol. 130. No. 6. P. 24–39.
3. Wang C., Ma Z., Li Y., Zeng J., Jin T., Liu H. Distortion calibrating method of measuring rail profile based on local affine invariant feature descriptor // *Measurement*. 2017. No. 110. P. 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.06.015>
4. Головатенко А.В., Уманский А.А., Дорофеев В.В. Основные тенденции развития рельсопрокатного производства в России и за рубежом. В кн.: *Metallurgiya: tehnologii, innovatsii, kachestvo: trudy XIX Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 15–16 dekabrya 2015 g. Chast' 1*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2015. С. 10–16.
5. Белолипецкая Е.С., Соловьев В.Н. Развитие оборудования для производства рельс высокоскоростных железных дорог. В кн.: *Материалы областного профильного семинара «Школа молодых ученых» по проблемам технических наук*. Липецк, 15 ноября 2019 г. Липецк: изд. Липецкого государственного технического университета, 2019. С. 9–12.
6. Пат. 2743534 С1 РФ. Способ изготовления железнодорожных рельсов повышенной износостойкости и контактной выносливости / Е.В. Полевой, Г.Н. Юнин, Е.П. Кузнецов, В.В. Дорофеев, А.В. Головатенко; опубл. 19.02.2021. Бюл. № 5.
7. Полевой Е.В., Юнин Г.Н., Темлянтsev М.В. Разработка и промышленное освоение технологии дифференцированной термической обработки железнодорожных рельсов с использованием тепла прокатного нагрева // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2016. Т. 59. № 10. С. 704–714. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-10-704-714>
8. Masoumi M., Tressia G., Centeno D.M.A., Goldenstein H. Improving the mechanical properties and wear resistance of a commercial pearlitic rail steel using a two-step heat treatment // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2021. Vol. 52. No. 11. P. 4888–4906. <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06432-0>
9. Юрьев А.Б., Юнин Г.Н., Головатенко А.В., Дорофеев В.В., Полевой Е.В. Разработка и внедрение первой в России технологии производства дифференцированно-термоупрочненных рельсов с использованием тепла прокатного нагрева // *Сталь*. 2016. № 11. С. 33–35.
10. Seo J.-W., Jun H.-K., Kwon S.-J., Lee D.-H. Rolling contact fatigue and wear of two different rail steels under rolling-sliding contact // *International Journal of Fatigue*. 2016. Vol. 83. Part 2. P. 323–334. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.10.012>
11. Sen P.K., Bhiwapurkar M., Harsha S.P. Rolling contact fatigue behavior of rail weldments under various load conditions: in Indian railways aspect // *International Journal of Mechanical and Production Engineering*. 2020. Vol. 10. No. 3. P. 10205–10212.
12. Dong Y.G., Zhang W.Z., Cao H. Determination of forward slip coefficient during heavy rail rolling using universal mill // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2008. Vol. 15. No. 2. P. 32–38. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(08\)60027-8](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(08)60027-8)
13. 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)
14. Shilov V.A., Shvarts D.L., Skosar' E.O. Aspects of the rolling of long rails on a universal rail-beam mill // *Metallurgist*. 2016. Vol. 60. No. 3-4. P. 260–266. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0284-9>
15. Gelder S., Buchmayr B., Linzer B., Hohenbichler G. Physical simulation of the hot direct rolling of steel // *Steel Research International*. 2011. Vol. 82. No. 10. P. 1213–1219. <https://doi.org/10.1002/srin.201000298>
16. Головатенко А.В., Волков К.В., Александров И.В., Кузнецов Е.П., Дорофеев В.В., Сапелкин О.И. Ввод в эксплуатацию
1. Grudev A.P., Mashkin L.F., Khanin M.I. *Technology of Rolling Production*. Moscow: Metallurgiya, 1994, 656 p. (In Russ.).
2. Mauk P.J., Overhagen C., Stellmacher U. Development of rolling technology in the long products sector. *Stahl und Eisen*. 2010, vol. 130, no. 6, pp. 24–39.
3. Wang C., Ma Z., Li Y., Zeng J., Jin T., Liu H. Distortion calibrating method of measuring rail profile based on local affine invariant feature descriptor. *Measurement*. 2017, no. 110, pp. 11–21. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.06.015>
4. Golovatenko A.V., Umanskiy A.A., Dorofeev V.V. Main trends in development of rail rolling production in Russia and abroad. In: *Proceedings of the XIX Int. Sci. and Pract. Conf. "Metallurgy: Technologies, Innovations, Quality"*. December 15–16, 2015. Part 1. Novokuznetsk: PC SibSIU, 2015, pp. 10–16. (In Russ.).
5. Belolipetskaya E.S., Solov'ev V.N. Development of equipment for production of high-speed rail. In: *Materials of the Regional Profile Seminar "School of Young Scientists" on the Problems of Technical Sciences, November 15, 2019, Lipetsk*. Lipetsk State Technical University, 2019, pp. 9–12. (In Russ.).
6. Polevoi E.V., Yunin G.N., Kuznetsov E.P., Dorofeev V.V., Golovatenko A.V. *Method for manufacturing railway rails of increased wear resistance and contact endurance*. Patent RF no. 2743534 C1. *Byulleten' izobretenii*. 2021, no. 5. (In Russ.).
7. Polevoi E.V., Yunin G.N., Temlyantsev M.V. Development and commercial introduction of technology for differentiated heat treatment of railway rails with rolling heat utilization. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 10, pp. 704–714. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-10-704-714>
8. Masoumi M., Tressia G., Centeno D.M.A., Goldenstein H. Improving the mechanical properties and wear resistance of a commercial pearlitic rail steel using a two-step heat treatment. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2021, vol. 52, no. 11, pp. 4888–4906. <https://doi.org/10.1007/s11661-021-06432-0>
9. Yur'ev A.B., Yunin G.N., Golovatenko A.V., Dorofeev V.V., Polevoi E.V. Development and implementation of the first technology in Russia for production of differential heat-strengthened rails using rolling heat. *Stal'*. 2016, no. 11, pp. 33–35. (In Russ.).
10. Seo J.-W., Jun H.-K., Kwon S.-J., Lee D.-H. Rolling contact fatigue and wear of two different rail steels under rolling-sliding contact. *International Journal of Fatigue*. 2016, vol. 83, part 2, pp. 323–334. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.10.012>
11. Sen P.K., Bhiwapurkar M., Harsha S.P. Rolling contact fatigue behavior of rail weldments under various load conditions: in Indian railways aspect. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*. 2020, vol. 10, no. 3, pp. 10205–10212.
12. Dong Y.G., Zhang W.Z., Cao H. Determination of forward slip coefficient during heavy rail rolling using universal mill. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2008, vol. 15, no. 2, pp. 32–38. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(08\)60027-8](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(08)60027-8)
13. 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)
14. Shilov V.A., Shvarts D.L., Skosar' E.O. Aspects of the rolling of long rails on a universal rail-beam mill. *Metallurgist*. 2016, vol. 60, no. 3-4, pp. 260–266. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0284-9>
15. Gelder S., Buchmayr B., Linzer B., Hohenbichler G. Physical simulation of the hot direct rolling of steel. *Steel Research International*. 2011, vol. 82, no. 10, pp. 1213–1219. <https://doi.org/10.1002/srin.201000298>
16. Golovatenko A.V., Volkov K.V., Aleksandrov I.V., Kuznetsov E.P., Dorofeev V.V., Sapelkin O.I. Commissioning of a universal rail-

- универсального рельсобалочного стана и освоение технологии производства рельсов на современном оборудовании в рельсобалочном цехе ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК» // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2014. № 6 (1374). С. 32–38.
17. Юрьев А.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Рубаникова Ю.А. Структура и свойства длинномерных дифференцированно закаленных рельсов после экстремально длительной эксплуатации. Екатеринбург: Полиграфист, 2020. 253 с.
18. Friebel G., Guriev S., Pittman R., Shevyakhova E., Tomová A. Railroad restructuring in Russia and central and eastern Europe: one solution for all problems? // *Transport Reviews*. 2007. Vol. 27. No. 3. P. 251–271. <https://doi.org/10.1080/01441640600979502>
19. ТУ 0921-323-01124323-2012. Рельсы железнодорожные типа Р65 категории ДТ370ИК производства ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», сваренные электроконтактным способом.
20. Абдурашитов А.Ю., Кузнецов С.В. Влияние неровностей на поверхность катания рельсов на уровень взаимодействия пути и подвижного состава // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2018. Т. 13. № 13 (13). С. 103–114.
21. Алехин А.Л., Блашко Л.С., Никеров Н.С. Прогнозирование одиночного выхода рельсов, сваренных алюминотермитным способом // *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2011. № 4 (29). С. 23–29.
22. Andersson R., Torstensson P.T., Kabo E., Larsson F. The influence of rail surface irregularities on contact forces and local stresses // *Vehicle System Dynamics. International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. 2015. Vol. 53. No. 1. P. 68–87. <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.982890>
23. Крысанов Л.Г. Об установлении геометрических нормативов коротких вертикальных неровностей на рельсах для скорости 250 км/ч // *Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта*. 2009. № 1. С. 15–21.
24. 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*. 2010. Vol. 33. No. 1. P. 31–35.
25. Pei N.N., Zhu G.M., Li B., Tao G.M., Kang Y.L. 3D thermo-mechanical coupled simulation of whole rolling process for 60 kg/m heavy rail // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2014. Vol. 21. No. 12. P. 1104–1110. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(14\)60190-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(14)60190-4)
26. 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)
27. Скосарь Е.О., Шилов В.А., Шварц Д.Л. Исследование температурных условий прокатки длинномерных рельсов на универсальном рельсобалочном стане // *Производство проката*. 2012. № 11. С. 7–11.
28. Сорокин В.Г., Волосникова А.В., Вяткин С.А. Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
29. ГОСТ Р 51685–2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия.
30. Белоліпецкая Е.С., Соловьев В.Н. Технологическая причина различия размеров концов рельс длиной 100 метров. В кн.: *Материалы областного профильного семинара «Школа молодых ученых» по проблемам технических наук. Липецк, 16 октября 2020 г. Липецк: изд. Липецкого государственного технического университета*. 2020. С. 23–26.
31. Технология прокатного производства. Т. 2 / М.А. Беньковский, К.Н. Боговяленский, А.И. Виткин, Э.А. Гарбер, С.А. Голованенко, Н.Ф. Грицуц, В.Т. Жадан, Ю.Д. Железнов, В.И. Зюзин, Н.В. Литовченко, А.И. Молчанов, А.Н. Петичев, П.И. Лопухин, М.М. Сафьян, А.В. Третьяков. М.: Металлургия, 1991. 423 с.
32. Рудской А.И., Лунев В.А. Теория и технология прокатного производства. СПб.: Лань, 2020. 528 с.
33. Muhin U., Belskij S., Makarov E., Koynov T. Application of between-stand cooling in the production hot-rolled strips // *Frattura ed*
- rolling mill and mastering the technology of rail production on modern equipment in the rail-rolling workshop of JSC EVRAZ ZSMK. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2014, no. 6 (1374), pp. 32–38.
17. Yur'ev A.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Rubannikova Yu.A. *Structure and Properties of Long-Length Differentially Hardened Rails after Extremely Long Operation*. Yekaterinburg: Poligrafist, 2020, 253 p. (In Russ.).
18. Friebel G., Guriev S., Pittman R., Shevyakhova E., Tomová A. Railroad restructuring in Russia and central and eastern Europe: one solution for all problems? *Transport Reviews*. 2007, vol. 27, no. 3, pp. 251–271. <https://doi.org/10.1080/01441640600979502>
19. ТУ 0921-323-01124323-2012. Railway rails of the R65 type of the DT370IK category manufactured by JSC EVRAZ ZSMK, welded by electric contact method. (In Russ.).
20. Abdurashitov A.Yu., Kuznetsov S.V. Influence of irregularities on rails rolling surface on interaction of the track and rolling stock. *Vnedrenie sovremennykh konstruksii i peredovykh tekhnologii v putevoe khozaystvo*. 2018, vol. 13, no. 13 (13), pp. 103–114. (In Russ.).
21. Alekhin A.L., Blazhko L.S., Nikerov N.S. Forecasting of a single output of rails welded by the aluminothermite method. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya*. 2011, no. 4 (29), pp. 23–29. (In Russ.).
22. Andersson R., Torstensson P.T., Kabo E., Larsson F. The influence of rail surface irregularities on contact forces and local stresses. *Vehicle System Dynamics. International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*. 2015, vol. 53, no. 1, pp. 68–87. <https://doi.org/10.1080/00423114.2014.982890>
23. Krysanov L.G. On establishment of geometric standards of short vertical irregularities on rails for a speed of 250 km/h. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*. 2009, no. 1, pp. 15–21. (In Russ.).
24. 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*. 2010, vol. 33, no. 1, pp. 31–35.
25. Pei N.N., Zhu G.M., Li B., Tao G.M., Kang Y.L. 3D thermo-mechanical coupled simulation of whole rolling process for 60 kg/m heavy rail. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2014, vol. 21, no. 12, pp. 1104–1110. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(14\)60190-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(14)60190-4)
26. 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)
27. Skosar' E.O., Shilov V.A., Shvarts D.L. Investigation of temperature conditions of long rails rolling on a universal rail-structural steel mill. *Proizvodstvo prokata*. 2012, no. 11, pp. 7–11. (In Russ.).
28. Sorokin V.G., Volosnikova A.V., Vyatkin S.A. *Grade Guide on Steels and Alloys*. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 640 p. (In Russ.).
29. GOST R 51685–2013. Railway rails. General technical conditions. (In Russ.).
30. Belolipetskaya E.S., Solov'ev V.N. Technological reason for difference in sizes of ends of 100-meter long rails. In: *Proceedings of the Regional Profile Seminar "School of Young Scientists" on the Problems of Technical Sciences, October 16, 2020*. Lipetsk: LSTU, 2020, pp. 23–26. (In Russ.).
31. Benyakovskii M.A., Bogoyavlenskii K.N., Vitkin A.I., Garber E.A., Golovanenko S.A., Gritsuk N.F., Zhadan V.T., Zheleznov Yu.D., Zyuzyin V.I., Litovchenko N.V., Molchanov A.I., Petichev A.N., Lopukhin P.I., Saf'yan M.M., Tret'yakov A.B. *Technology of Rolling Production: Vol. 2*. Moscow: Metallurgiya, 1991, 423 p. (In Russ.).
32. Rudskoi A.I., Lunev V.A. *Theory and Technology of Rolling Production*. St. Petersburg: Lan', 2020, 528 p. (In Russ.).
33. Muhin U., Belskij S., Makarov E., Koynov T. Application of between-stand cooling in the production hot-rolled strips. *Frattura ed*

- Integrata Strutturale. 2016. Vol. 10. No. 37. P. 312–317.  
<https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.37.41>
34. Wang M.T., Zang X.L., Li X.T., Du F.S. Finite element simulation of hot strip continuous rolling process coupling microstructural evolution // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2007. Vol. 14. No. 3. P. 30–36. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(07\)60039-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(07)60039-9)
35. Zhou S.X. An integrated model for hot rolling of steel strips // *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. Vol. 134. No. 3. P. 338–351. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)01118-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01118-4)
36. Hwang S.M., Sun C.G., Ryoo S.R., Kwak W.J. An integrated FE process model for precision analysis of thermo-mechanical behaviors of rolls and strip in hot strip rolling // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2002. Vol. 191. No. 37. P. 4015–4030. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(02\)00298-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(02)00298-0)
37. Mei R.B., Li C.S., Liu X.H., Han B. Analysis of strip temperature in hot rolling process by finite element method // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2010. Vol. 17. No. 2. P. 17–21. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60052-0](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60052-0)
38. Мухин Ю.А., Соловьев В.Н., Шунин А.В., Макаров Е.В. Стабилизация структуры и механических свойств по длине полосы при горячей прокатке слябов большой массы. В кн.: Проблемы фундаментальной механики в теории обработки металлов давлением. Труды расширенного научного семинара. М.: МАМИ, 2008. С. 117–126.
- Integrata Strutturale*. 2016, vol. 10, no. 37, pp. 312–317.  
<https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.37.41>
34. Wang M.T., Zang X.L., Li X.T., Du F.S. Finite element simulation of hot strip continuous rolling process coupling microstructural evolution. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2007, vol. 14, no. 3, pp. 30–36. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(07\)60039-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(07)60039-9)
35. Zhou S.X. An integrated model for hot rolling of steel strips. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003, vol. 134, no. 3, pp. 338–351. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)01118-4](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01118-4)
36. Hwang S.M., Sun C.G., Ryoo S.R., Kwak W.J. An integrated FE process model for precision analysis of thermo-mechanical behaviors of rolls and strip in hot strip rolling. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2002, vol. 191, no. 37, pp. 4015–4030. [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(02\)00298-0](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(02)00298-0)
37. Mei R.B., Li C.S., Liu X.H., Han B. Analysis of strip temperature in hot rolling process by finite element method. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2010, vol. 17, no. 2, pp. 17–21. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60052-0](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60052-0)
38. Mukhin Yu.A., Solov'ev V.N., Shunin A.V., Makarov E.V. Stabilization of structure and mechanical properties along the strip length during hot rolling of slabs of large mass. In: *Problems of Fundamental Mechanics in the Theory of Metalworking by Pressure: Proceedings of an Extended Sci. Seminar*. Moscow: MAMI, 2008, pp. 117–126. (In Russ.).

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Владимир Николаевич Соловьев**, к.т.н., доцент кафедры обработки металлов давлением, Липецкий государственный технический университет  
**ORCID:** 0000-0003-1453-2422  
**E-mail:** solovyovvn@mail.ru

**Елизавета Сергеевна Белолипецкая**, студент кафедры обработки металлов давлением, Липецкий государственный технический университет  
**E-mail:** belolipetskaya\_es@mail.ru

**Vladimir N. Solov'ev**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Metal Forming, Lipetsk State Technical University  
**ORCID:** 0000-0003-1453-2422  
**E-mail:** solovyovvn@mail.ru

**Elizaveta S. Belolipetskaya**, Student of the Chair of Metal Forming, Lipetsk State Technical University  
**E-mail:** belolipetskaya\_es@mail.ru

Поступила в редакцию 23.12.2021  
После доработки 18.01.2022  
Принята к публикации 19.01.2022

Received 23.12.2021  
Revised 18.01.2022  
Accepted 19.01.2022



Оригинальная статья

УДК 504.06

DOI 10.17073/0368-0797-2022-6-390-398

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2319>



## РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

О. П. Черникова, Ю. А. Златицкая

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

**Аннотация.** Сбалансированное развитие мирового сообщества в ближайшее десятилетие предполагает достижение целей устойчивого развития вследствие повышения эффективности использования ресурсов экономической, социальной и экологической сфер человеческой деятельности. В рамках глобализационных процессов, неизбежно затрагивающих национальную экономическую, социальную и экологическую повестки, все большую роль приобретают две последних составляющих. Основные мероприятия государственной национальной политики Российской Федерации направлены на решение социально-экономических задач, обеспечивающих реализацию права каждого человека на благоприятную окружающую среду. Своевременное решение вопросов социального и экологического благополучия как индикаторов качества жизни населения является приоритетной задачей органов государственной власти регионов совместно с высшим менеджментом градообразующих предприятий, несущих преобладающие социальную и экологическую нагрузки. Повышение эффективности использования ресурсов приобретает особую значимость в регионах с доминирующим размещением металлургического производства. Загрязнение атмосферного воздуха и воды, высокий уровень профессиональной заболеваемости и производственного травматизма, вызванного износом оборудования и нарушением техники безопасности на производственных объектах, преобладание смертности над рождаемостью, интенсивный миграционный отток населения, износ инженерной инфраструктуры при одновременно растущих объемах промышленного производства отражают несбалансированность положения металлургического региона, препятствуют устойчивости его развития. Проведенное научное исследование позволило разработать систему показателей оценки ресурсоэффективности металлургического производства, предусматривающую их группировку по компонентам развития. Это позволяет менеджменту оценить вклад каждой совокупности составляющих в результирующее значение, предложить мероприятия и ориентиры оптимизации коэффициентов, выявить факторы роста конкурентоспособности бизнеса, определить целевые направления инвестирования, а также продемонстрировать мировому сообществу трансформацию производственно-хозяйственной деятельности компаний в соответствии с глобальными трендами ресурсосбережения и устойчивости.

**Ключевые слова:** металлургическая компания, устойчивое развитие, ресурсоэффективность, экология, социум

**Для цитирования:** Черникова О.П., Златицкая Ю.А. Ресурсоэффективность металлургического производства // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 6. С. 390–398. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-390-398>

Original article

## RESOURCE EFFICIENCY OF METALLURGICAL PRODUCTION

O. P. Chernikova, Yu. A. Zlatitskaya

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

**Abstract.** The balanced development of the world community in the next decade implies achievement of sustainable development goals by increasing the efficiency of resources utilization in the economic, social and environmental spheres of human activity. Within the framework of globalization processes, which inevitably affect the national economic, social and environmental agenda, the last two spheres are becoming increasingly important. The main measures of the state national policy of the Russian Federation are aimed at solving social and economic problems that ensure realization of the right of every person to a favorable environment. Timely solution of the problems of social and environmental well-being, as indicators of the life quality of population, is a priority task of the state authorities of the regions together with the top management of city-forming enterprises that bear major social and environmental burden. Increase in the resources utilization efficiency is of particular importance in regions with a dominant location of metallurgical production. Atmosphere and water pollution, a high level of occupational morbidity and injuries caused by equipment wear and safety violations at production facilities, the prevalence of mortality over births, an intensive migration outflow of the population, depreciation of engineering infrastructure with simultaneously growing industrial output reflect the imbalance in situation of the metallurgical region, delay its sustainable development. The conducted scientific research made it possible to develop a system of indicators for assessing the resource efficiency of metallurgical production with their grouping by development components. It makes possible for the management to evaluate the contribution of each set of components to the resulting value, propose measures and guidelines for optimizing coefficients, identify business competitiveness growth

factors, determine investment targets, and also demonstrate to the world community the transformation of production and economic activities of companies in accordance with global trends in resource conservation and sustainability.

**Keywords:** metallurgical company, sustainable development, resource efficiency, ecology, society

**For citation:** Chernikova O.P., Zlatitskaya Yu.A. Resource efficiency of metallurgical production. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 6, pp. 390–398. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-390-398>

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях развития цифровой экономики, высокой конкуренции между странами в производстве отдельных видов продукции, истощения мирового природно-ресурсного потенциала, глобального изменения климата, в целях поддержания устойчивого развития территорий, на которых находятся предприятия, активно использующие в своей деятельности экономические, социальные и экологические ресурсы, особую актуальность приобретают вопросы повышения ресурсоэффективности (рациональное использование доступных ресурсов с минимальными затратами или получение максимально возможного объема продукции с помощью рассматриваемых факторов производства).

В России ресурсоэффективность рассматривается преимущественно сквозь призму роста энергоэффективности и развития возобновляемых источников энергии, внедрения мер экономического стимулирования сокращения выбросов, сбросов, образования и утилизации отходов. Стратегия долгосрочного устойчивого развития Российской Федерации до 2030 г. устанавливает тренд решения социально-экономических проблем, обеспечивающего снижение «углеродного следа», сохранение благоприятной экологической обстановки в регионах, разнообразия флоры, фауны, природных ресурсов [1]. Мировая повестка устойчивого развития планеты, исследуемая российскими и зарубежными учеными, многогранна. В работах [2, 3] изучают подходы к анализу и основы устойчивости организаций, различные аспекты «зеленой экономики» [4–7] и низкоуглеродного производства [8–10], инновационные тренды в целях повышения инвестиционной привлекательности [11, 12], экономический, конкурентный и адаптационный потенциал организаций [13–15], а также влияние предприятий металлургического сектора на окружающую среду и изменение климата [16–19].

Большинство исследователей транслирует единство трех компонент (экономической, социальной и экологической), при этом в качестве ключевого метода, способного поддерживать баланс между ними, выступает оценка ресурсоэффективности.

В настоящее время практически все производители продукции черной металлургии нацелены на оптимизацию расходов за счет снижения уровней потребления сырья, воды, энергии, а также на экологизацию своей деятельности за счет сокращения объемов выбросов парниковых газов, сточных вод и оказания других воздействий на окружающую среду. Реализации этого спо-

собствует давление со стороны Евросоюза, который в целях сокращения углеродного следа организаций намерен ввести трансграничный углеродный налог для импортеров «грязных товаров». По данным за 2020 г. импорт железа и стали из России в ЕС, потенциально подпадающий под этот вид налогообложения, составил 10,17 млн т или 3963,7 млн евро. В связи с этим в Министерстве промышленности и торговли Российской Федерации потенциальные потери отрасли от нововведений оценивают в сумму до 800 млн долларов в год.

Производители металлургического сектора по всему миру демонстрируют приверженность «зеленой повестке» и целям устойчивого развития. ArcelorMittal заявляет, что к 2050 г. производство стали в Евросоюзе станет абсолютно безуглеродным. Ряд зарубежных компаний (австралийская Voestalpine, датская Orsted, шведские SSAB, LKAB и Vattenfall) внедряют водородные проекты. На этом фоне крупные металлопроизводители отказываются от сделок с «грязными производствами», так как не желают приобретать сырье с большим углеродным следом. При этом за последние 30 лет в России не было открыто ни одного комбината полного цикла по выпуску продукции черной металлургии, а действующие производственные объекты оснащены устаревшим оборудованием с высокими показателями трудоемкости, энергоемкости, экологических рисков. Все это снижает конкурентоспособность российской металлопродукции.

Отечественные металлурги в сложившейся ситуации стараются трансформировать бизнес в «зеленом направлении». ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (НЛМК) за 20-летний период на природоохранную деятельность направил почти 1,3 млрд долларов (более 51 млрд рублей). За это время в два раза был увеличен объем производства продукции, но воздействие на экологию существенно снизилось за счет применения современных технологий и модернизации оборудования. Показатели производственных выбросов соответствуют наилучшим доступным российским технологиям: в 2020 г. удельные выбросы оксида CO<sub>2</sub> от производственной деятельности комбината составили 1,91 т на одну т стали и 1,39 т на одну т чугуна, что на 5 % выше эталона EU ETS. В планах компании сократить до 3 %.

Согласно сведениям Росгидромета и Минприроды комплексный индекс загрязнения атмосферы в Липецке, где расположен ключевой актив НЛМК, в 2019 г. составил три единицы. Город стал самым экологичным центром отечественной металлургии, опередив произ-

водственные площадки металлургических гигантов по чистоте воздуха: Новокузнецк (17 единиц), Магнитогорск (13 единиц), Нижний Тагил (7 единиц), Череповец (3,9 единицы).

За 20 лет 13,4 млрд долларов направил на природоохранную деятельность ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК), 50 % которых было направлено на строительство новых и реконструкцию существующих на предприятии объектов. Компания планомерно снижает углеродный след в первом переделе, повторно использует энергоресурсы, разрабатывает «зеленые» энергопроекты. В 2020 г. удельные выбросы оксида CO<sub>2</sub> составили 2,18 т на одну т жидкой стали, при этом через пять лет запланировано снижение углеродоемкости готовой продукции до 1,8 т CO<sub>2</sub>-эквивалента на т.

За предшествующую пятилетку ММК на 14 900 т в год сократил выбросы в атмосферу. В 2020 г. удельные выбросы оксида SO<sub>2</sub> в первом переделе составили 0,4 кг на т стали за счет использования в агломерационном цехе модернизированных сероулавливающих установок. Это на 35 % ниже уровня, достигнутого ведущими металлургическими компаниями Европы. На ближайшую пятилетку финансирование природоохранных объектов планируется в размере 35 млрд рублей. За обозначенный период компания планирует снизить выбросы загрязняющих веществ: валовые – в два раза, удельные – в три раза по отношению к 2020 г.

В 2020 г. ПАО «Северсталь» инвестировало в природоохрану 5,6 млрд рублей, что почти на 50 % больше, чем в 2019 г. Удельные выбросы парниковых газов в структурных подразделениях главного производственного звена ПАО «Северсталь» (Череповецкого металлургического комбината) в 2019 г. составили 2,08 т оксида CO<sub>2</sub> на одну т жидкой стали (среднемировой показатель для сталелитейных предприятий – 2,3 т). К 2023 г. компания намерена по 1 % в год снижать интенсивность выбросов парниковых газов. Через пять лет, по мнению руководства компании, выбросы должны быть снижены на величину, превышающую 66 000 т.

Более 2,3 млрд рублей в 2020 г. «ЕВРАЗ» инвестировал в природоохрану комбинатов Нижнего Тагила и Качканара. На производственной площадке «ЕВРАЗ НТМК» была остановлена выработавшая свой ресурс доменная печь № 5 и запущена после технического перевооружения доменная печь № 6. С учетом запущенной ранее доменной печи № 7 предприятие позиционирует себя самым чистым доменщиком в России.

К 2020 г. углеродоемкость продукции на тонну сырой стали в компании составила 1,97 т CO<sub>2</sub>-эквивалента. В десятилетних планах холдинга планируется снижение углеродного следа на 20 %, валовых выбросов при плавлении стали – на 33 %. Кроме того, планируется утилизация 75 % выбросов метана, образующегося при дегазации от подземной добычи угля.

Менеджмент ОАО «Металлоинвест» до 2036 г. рас-

считывает на 15 % сократить выбросы парниковых газов относительно показателей 2019 г. В 2020 г. общий объем выбросов парниковых газов компании составил 69,3 млн т CO<sub>2</sub>-эквивалента. К 2050 г. ОАО «Металлоинвест» рассчитывает завершить переход на чистый водород в технологическом процессе и приобрести углеродные офсетсы на выбросы, которые нельзя сократить, чтобы достичь углеродной нейтральности<sup>1</sup>.

Другие компании тоже вносят посильный вклад в реализацию экологической и климатической повестки, при этом для защиты окружающей среды и устойчивого развития важны учет и оценка целого спектра факторов, позволяющих определить эффективность принимаемых управленческих решений: оценка жизненного цикла воздействия производственных процессов на окружающую среду [20 – 29]; использование наилучших доступных технологий [30, 31]; уровень энергопотребления производства [32 – 35].

Предметом настоящего научного исследования являются показатели оценки ресурсоэффективности металлургического производства, характеризующие уровни достижения экономических, социальных и экологических результатов деятельности предприятий при реализации стратегии устойчивого развития.

Цель настоящей работы – разработка системы показателей оценки ресурсоэффективности в контексте устойчивости металлургического производства.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

При постановке цели и определении задач был использован абстрактно-логический метод изучения и анализа результатов воздействия металлургической промышленности на экономический, социальный и экологический аспекты деятельности общества. Для комплексного исследования целевой проблематики был использован системный подход при изучении научной литературы.

В процессе изучения влияния металлургических предприятий на экологию и социум использовали следующие методы: статистический с анализом фактических данных о нарушениях законодательства; метод сравнительного анализа характера техногенного воздействия металлургического производства на окружающую среду; методы синхронного и диахронного анализов.

На этапе разработки системы показателей оценки ресурсоэффективности применялся метод статистического обобщения и синтеза процессов комплексного воздействия металлургического производства на экономическую эффективность деятельности предприятия, окружающую среду и социум.

<sup>1</sup> Шульга Ю. Устойчивое развитие и экология в металлургии: обзор деятельности российских компаний. Режим доступа: <https://www.forbes.ru/obshchestvo/432897-ustoychivoe-razvitiye-i-ekologiya-v-metallurgii-obzor-deyatelnosti-rossiyskih> (Дата обращения: 31.01.2022).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Особенность российского металлургического комплекса заключается в его структурообразующей функции, поскольку более 70 % предприятий являются градообразующими и выполняют функции работодателя и источника пополнения местного бюджета. Финансовое состояние и тренды развития металлургических предприятий оказывают значительное влияние на экономику и социальный климат регионов пребывания компаний. При этом на элементы окружающей среды регионов пребывания отрасль действует негативно (см. таблицу).

Исследование показало, что устойчивое развитие моноотраслевых территорий с преобладанием металлургических производств возможно на основе баланса экономических интересов менеджмента металлургических предприятий, социальных и экологических интересов населения, органов власти территории.

Особенностью развития финансово-экономических отношений в современном бизнесе является возрастающее внимание менеджмента к экономическому анализу производственно-хозяйственной деятельности организаций. Несмотря на насыщенный арсенал методик, показателей и инструментов, методология экономического анализа в современных условиях должна быть дополнена оценкой и диагностикой степени использования не только экономических, но и социальных, экологических, временных и других видов ресурсов. В связи с этим для принятия эффективных управленческих решений руководству металлургических компаний необходима система индикаторов, информирующих о состоянии результатов и затрат по экономическому,

социальному, экологическому и другим аспектам, позволяющая оценить ресурсоэффективность.

В контексте устойчивости металлургического производства под ресурсоэффективностью понимается уровень соотношения результатов производственно-хозяйственной деятельности предприятия и затрат на обеспечение баланса семи компонент (экономической, трудовой, финансовой, информационной, временной, социальной и экологической). Разработанная комплексная система показателей и инструментов диагностики, планирования и оценки ресурсоэффективности металлургического производства соответствует миссии и стратегическим целям устойчивого развития компаний рассматриваемой отрасли в современных реалиях.

Расчет ресурсоэффективности металлургического производства (РП) рекомендуется проводить в соответствии со следующей методикой:

$$РП = ЭР + СР + Э,$$

где ЭР, СР и Э – экономическая, социальная и экологическая ресурсоэффективности, доли ед.

Экономическая ресурсоэффективность определяется по формуле:

$$ЭР = МР + ТР + ФР + ИР + ВР,$$

где МР, ТР, ФР, ИР и ВР – материальная, трудовая, финансовая, информационная и временная ресурсоэффективности, доли ед.

Материальная ресурсоэффективность определяется по формуле:

### Результаты анализа техногенного воздействия металлургического производства на элементы окружающей среды

#### Analysis results of the technogenic impact of metallurgical production on the environment elements

Элементы окружающей среды	Характер воздействия	Итоги антропогенной нагрузки
Вода	Водозабор, сброс загрязненных шламами и пылью вод	Загрязнение водного бассейна и уменьшение его запасов
Воздух	Выбросы в воздушный бассейн газов, пыли и шламов (CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , NO, хлор, фтор и др.)	Запыление и загазовывание воздушного бассейна
Почвы	Строительство зданий и сооружений, прокладка коммуникаций; осаждение на почвы пылевых выбросов из атмосферы, размещение отходов металлургии, содержащих мышьяк, серу, фосфор, тяжелые цветные металлы (цинк, свинец и др.)	Уменьшение площадей продуктивных сельскохозяйственных земель, загрязнение почв, накопление тяжелых металлов
Растения и животные	Осаждение пылевых выбросов из атмосферы, воздействие экотоксикантов	Сокращение площадей и загрязнение среды обитания, угнетение растений
Недра	Существенных воздействий нет	Практически отсутствует
Социум	Загрязнение воздушного и водного бассейнов, почв, техногенные катастрофы	Рост заболеваемости, сокращение продолжительности и ухудшение условий жизни, гибель при техногенных катастрофах

$$MP = I_{\text{ФО}} + I_{\text{МО}} + I_{\text{ООС}} + I_{\text{ВГ}} + I_{\text{БФ}} + I_{\text{ЭО}} + I_{\text{ЭЭ}},$$

где  $I_{\text{ФО}} = \frac{\text{ФО}_{\text{ФАКТ}}}{\text{ФО}_{\text{БАЗ}}}$  – индекс фондоотдачи, доли ед.;

$I_{\text{МО}} = \frac{\text{МО}_{\text{ФАКТ}}}{\text{МО}_{\text{БАЗ}}}$  – индекс материалоотдачи, доли ед.;

$I_{\text{ООС}} = \frac{\text{КО}_{\text{ФАКТ}}}{\text{КО}_{\text{БАЗ}}}$  – индекс оборачиваемости оборот-

ных средств, доли ед.;  $I_{\text{ВГ}} = \frac{\text{ВГ}_{\text{ФАКТ}}}{\text{ВГ}_{\text{БАЗ}}}$  – индекс выхода

годного, учитывающий потери при плавке, заливке, в литниковой системе, продуктовый брак, доли ед.;

$I_{\text{БФ}} = \frac{\text{БФ}_{\text{ФАКТ}}}{\text{БФ}_{\text{БАЗ}}}$  – индекс бракованных форм, доли ед.;

$I_{\text{ЭО}} = \frac{\text{ЭО}_{\text{ФАКТ}}}{\text{ЭО}_{\text{БАЗ}}}$  – индекс эффективности использования

оборудования, доли ед.;  $I_{\text{ЭЭ}} = \frac{\text{ЭЭ}_{\text{ФАКТ}}}{\text{ЭЭ}_{\text{БАЗ}}}$  – индекс энерго-

эффективности, доли ед.;  $\text{ФО}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{ФО}_{\text{БАЗ}}$  – фондоотдача по факту и в базовом периоде;  $\text{МО}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{МО}_{\text{БАЗ}}$  – материалоотдача по факту и в базовом периоде;  $\text{КО}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{КО}_{\text{БАЗ}}$  – коэффициент оборачиваемости по факту и в базовом периоде;  $\text{ВГ}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{ВГ}_{\text{БАЗ}}$  – выход годного по факту и в базовом периоде;  $\text{БФ}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{БФ}_{\text{БАЗ}}$  – количество бракованных форм по факту и в базовом периоде;  $\text{ЭО}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{ЭО}_{\text{БАЗ}}$  – эффективность использования оборудования по факту и в базовом периоде;  $\text{ЭЭ}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{ЭЭ}_{\text{БАЗ}}$  – энергоотдача по факту и в базовом периоде.

Трудовая ресурсоэффективность определяется по формуле:

$$TP = I_{\text{ПР}} + I_{\text{ЗО}},$$

где  $I_{\text{ПР}} = \frac{\text{ПР}_{\text{ФАКТ}}}{\text{ПР}_{\text{БАЗ}}}$  – индекс производительности труда

рабочего, доли ед.;  $I_{\text{ЗО}} = \frac{\text{ЗО}_{\text{ФАКТ}}}{\text{ЗО}_{\text{БАЗ}}}$  – индекс зарплато-

отдачи, доли ед.;  $\text{ПР}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{ПР}_{\text{БАЗ}}$  – производительность труда рабочего по факту и в базовом периоде;  $\text{ЗО}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{ЗО}_{\text{БАЗ}}$  – зарплатоотдача по факту и в базовом периоде.

Финансовая ресурсоэффективность определяется по формуле:

$$FP = I_{\text{Р}} + I_{\text{РП}} + I_{\text{РИ}} + I_{\text{ПД}},$$

где  $I_{\text{Р}} = \frac{\text{Р}_{\text{ФАКТ}}}{\text{Р}_{\text{БАЗ}}}$  – индекс рентабельности продукции,

доли ед.;  $I_{\text{РП}} = \frac{\text{РП}_{\text{ФАКТ}}}{\text{РП}_{\text{БАЗ}}}$  – индекс рентабельности про-

даж, доли ед.;  $I_{\text{РИ}} = \frac{\text{РИ}_{\text{ФАКТ}}}{\text{РИ}_{\text{БАЗ}}}$  – индекс рентабельности

инвестиций, доли ед.;  $I_{\text{ПД}} = \frac{\text{ПД}_{\text{ФАКТ}}}{\text{ПД}_{\text{БАЗ}}}$  – индекс покры-

тия долга, доли ед.;  $\text{Р}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{Р}_{\text{БАЗ}}$  – рентабельность про-

дукции по факту и в базовом периоде;  $\text{РП}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{РП}_{\text{БАЗ}}$  – рентабельность продаж по факту и в базовом периоде;  $\text{РИ}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{РИ}_{\text{БАЗ}}$  – рентабельность инвестиций по факту и в базовом периоде;  $\text{ПД}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{ПД}_{\text{БАЗ}}$  – коэффициент покрытия долга по факту и в базовом периоде.

Информационная ресурсоэффективность определяется по формуле:

$$IP = I_{\text{ПЦ}} + I_{\text{В}} + I_{\text{ОСЗ}} + I_{\text{С}} + I_{\text{ОСР}},$$

где  $I_{\text{ПЦ}} = \frac{\text{ПЦ}_{\text{БАЗ}}}{\text{ПЦ}_{\text{ФАКТ}}}$  – индекс продолжительности произ-

водственного цикла, доли ед.;  $I_{\text{В}} = \frac{\text{В}_{\text{ФАКТ}}}{\text{В}_{\text{БАЗ}}}$  – индекс до-

хода от продаж продукции, доли ед.;  $I_{\text{ОСЗ}} = \frac{\text{ОСЗ}_{\text{БАЗ}}}{\text{ОСЗ}_{\text{ФАКТ}}}$  –

индекс оборотных средств в запасах, доли ед.;

$I_{\text{С}} = \frac{\text{С}_{\text{БАЗ}}}{\text{С}_{\text{ФАКТ}}}$  – индекс себестоимости продукции, доли ед.;

$I_{\text{ОСР}} = \frac{\text{ОСР}_{\text{БАЗ}}}{\text{ОСР}_{\text{ФАКТ}}}$  – индекс оборачиваемости средств

в расчетах, доли ед.;  $\text{ПЦ}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{ПЦ}_{\text{БАЗ}}$  – продолжительность цикла по факту и в базовом периоде;  $\text{В}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{В}_{\text{БАЗ}}$  – доход от продаж продукции по факту и в базовом периоде;  $\text{ОСЗ}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{ОСЗ}_{\text{БАЗ}}$  – оборотные средства в запасах по факту и в базовом периоде;  $\text{С}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{С}_{\text{БАЗ}}$  – себестоимость продукции по факту и в базовом периоде;  $\text{ОСР}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{ОСР}_{\text{БАЗ}}$  – оборотные средства в расчетах по факту и в базовом периоде.

Временная ресурсоэффективность определяется по формуле:

$$VP = I_{\text{П}} + I_{\text{ПО}} + I_{\text{ППР}},$$

где  $I_{\text{П}} = \frac{\text{П}_{\text{ФАКТ}}}{\text{П}_{\text{ПЛ}}}$  – индекс выполнения плана произ-

водства, доли ед.;  $I_{\text{ПО}} = \frac{\text{ПО}_{\text{ФАКТ}}}{\text{ПО}_{\text{ПЛ}}}$  – индекс простоев обо-

рудования, доли ед.;  $I_{\text{ППР}} = \frac{\text{ППР}_{\text{ФАКТ}}}{\text{ППР}_{\text{ПЛ}}}$  – индекс выпол-

нения плана продаж, доли ед.;  $\text{П}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{П}_{\text{ПЛ}}$  – объем производства продукции по факту и в базовом периоде;  $\text{ПО}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{ПО}_{\text{ПЛ}}$  – время простоев оборудования по факту и в базовом периоде;  $\text{ППР}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{ППР}_{\text{ПЛ}}$  – объем продаж по факту и в базовом периоде.

Социальная ресурсоэффективность определяется по формуле:

$$SP = I_{\text{ТР}} + I_{\text{НСС}} + I_{\text{А}} + I_{\text{РО}} + I_{\text{Ш}} + I_{\text{ЗП}} + I_{\text{Д}},$$

где  $I_{\text{ТР}} = \frac{\text{ТР}_{\text{БАЗ}}}{\text{ТР}_{\text{ФАКТ}}}$  – индекс травматизма работников пред-

приятия, доли ед.;  $I_{\text{НСС}} = \frac{\text{НСС}_{\text{БАЗ}}}{\text{НСС}_{\text{ФАКТ}}}$  – индекс несчаст-

ных случаев со смертельным исходом, доли ед.;  $I_A = \frac{A_{\text{БАЗ}}}{A_{\text{ФАКТ}}}$  – индекс аварий на производстве, доли ед.;  $I_{\text{РО}} = \frac{\text{РО}_{\text{БАЗ}}}{\text{РО}_{\text{ФАКТ}}}$  – индекс количества нарушителей правил промышленной безопасности, привлеченных к ответственности, доли ед.;  $I_{\text{Ш}} = \frac{\text{Ш}_{\text{БАЗ}}}{\text{Ш}_{\text{ФАКТ}}}$  – индекс сумм штрафов, уплаченных предприятием по результатам проверок соблюдения правил промышленной безопасности, доли ед.;  $I_{\text{ЗП}} = \frac{\text{ЗП}_{\text{ОТР}}}{\text{ЗП}_{\text{СР.РЕГ}}}$  – индекс размера оплаты труда рабочего отрасли к размеру среднерегиональной оплаты труда, доли ед.;  $I_{\text{Д}} = \frac{D_{\text{ФАКТ}}}{\text{НЧЗ}_{\text{ФАКТ}}}$  – индекс своевременности выплаты заработной платы работникам, доли ед.;  $\text{ТР}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{ТР}_{\text{БАЗ}}$  – травматизм работников по факту и в базовом периоде;  $\text{НСС}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{НСС}_{\text{БАЗ}}$  – число несчастных случаев со смертельным исходом по факту и в базовом периоде;  $A_{\text{ФАКТ}}$  и  $A_{\text{БАЗ}}$  – количество аварий на производстве по факту и в базовом периоде;  $\text{РО}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{РО}_{\text{БАЗ}}$  – число работников, привлеченных к ответственности по факту и в базовом периоде;  $\text{Ш}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{Ш}_{\text{БАЗ}}$  – сумма штрафов за нарушение требований промышленной безопасности по факту и в базовом периоде;  $\text{ЗП}_{\text{ОТР}}$  – оплата труда рабочего отрасли;  $\text{ЗП}_{\text{СР.РЕГ}}$  – средняя региональная оплата труда работника;  $D_{\text{ФАКТ}}$  – сумма долгов по заработной плате по факту;  $\text{НЧЗ}_{\text{ФАКТ}}$  – сумма начисленной заработной платы по факту.

Экологическая ресурсоэффективность определяется по формуле:

$$\Xi = I_{\text{ПЖ}} + I_3 + I_{\text{НЗ}} + I_{\text{ВВ}} + I_{\text{СВ}} + I_{\text{ФПМ}},$$

где  $I_{\text{ПЖ}} = \frac{\text{ПЖ}_{\text{ФАКТ}}}{\text{ПЖ}_{\text{БАЗ}}}$  – индекс продолжительности жизни людей в регионе пребывания предприятия, доли ед.;  $I_3 = \frac{Z_{\text{БАЗ}}}{Z_{\text{ФАКТ}}}$  – индекс заболеваемости людей в регионе пребывания предприятия, доли ед.;  $I_{\text{НЗ}} = \frac{\text{НЗ}_{\text{БАЗ}}}{\text{НЗ}_{\text{ФАКТ}}}$  – индекс площади нарушенных земель, доли ед.;  $I_{\text{ВВ}} = \frac{\text{ВВ}_{\text{БАЗ}}}{\text{ВВ}_{\text{ФАКТ}}}$  – индекс выбросов загрязняющих веществ, доли ед.;  $I_{\text{СВ}} = \frac{\text{СВ}_{\text{БАЗ}}}{\text{СВ}_{\text{ФАКТ}}}$  – индекс сброса сточных вод, доли ед.;  $I_{\text{ФПМ}} = \frac{\text{ФПМ}_{\text{ФАКТ}}}{\text{ФПМ}_{\text{БАЗ}}}$  – индекс размера финансирования природоохранных мероприятий, доли ед.;  $\text{ПЖ}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{ПЖ}_{\text{БАЗ}}$  – продолжительность жизни человека по факту и в базовом периоде;  $Z_{\text{ФАКТ}}$  и  $Z_{\text{БАЗ}}$  – заболеваемость людей в регионе по факту и в базовом

периоде;  $\text{НЗ}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{НЗ}_{\text{БАЗ}}$  – площадь нарушенных земель по факту и в базовом периоде;  $\text{ВВ}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{ВВ}_{\text{БАЗ}}$  – объем выбросов загрязняющих веществ по факту и в базовом периоде;  $\text{СВ}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{СВ}_{\text{БАЗ}}$  – объем сброса сточных вод по факту и в базовом периоде;  $\text{ФПМ}_{\text{ФАКТ}}$  и  $\text{ФПМ}_{\text{БАЗ}}$  – сумма финансирования природоохранных мероприятий по факту и в базовом периоде.

Использование такой системы показателей, инструментов диагностики, планирования и оценки ресурсоэффективности в практической деятельности экономистов металлургических предприятий позволит получать достоверную информацию о фактическом состоянии всех компонент устойчивого развития бизнеса, разрабатывать меры и ориентиры оптимизации коэффициентов, выявлять конкурентные преимущества и недостатки производственно-хозяйственной деятельности, целенаправленно и обоснованно распределять финансирование между структурными подразделениями компании разного функционала.

## Выводы

Вопросы ресурсоэффективности, как правило, рассматриваются в логике показателей использования экономических ресурсов в конкретный момент времени. При этом в контексте устойчивости развития комплексная оценка эффективности использования ресурсов возможна только с учетом фактора времени (соотношения фактических значений показателей с базовыми). Разработанная система показателей оценки ресурсоэффективности металлургического производства, предусматривающая их группировку по компонентам устойчивого развития, позволяет оценить вклад каждой совокупности составляющих в результирующее значение, предложить мероприятия и ориентиры оптимизации коэффициентов, выявить факторы роста конкурентоспособности, определить целевые направления инвестирования. Деформация структуры ресурсоэффективности в пользу экономической составляющей позволяет бизнесу эффективно функционировать лишь в краткосрочной перспективе. Улучшение показателей экономической ресурсоэффективности для металлургической отрасли в значительной степени обусловлено позитивной динамикой показателей социальной и экологической ресурсоэффективности. С точки зрения стратегического развития повышение социальной и экологической ресурсоэффективности предприятий соответствует целям устойчивости мирового сообщества. Сбалансированное управление всеми компонентами позволит металлургии освоить новые рынки сбыта, привлечь инвестиции, повысить собственную конкурентоспособность, обеспечить финансовую стабильность и возможности перспективного устойчивого развития.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Черникова О.П. Формирование отчетности об устойчивом развитии в российской практике // Экономика и финансы. 2019. № 7. С. 55–65.
2. Махмадов Н.Р. Исследование существующих подходов к анализу устойчивого развития // Экономика и предпринимательство. 2020. № 1 (114). С. 782–786.
3. Bastas A., Liyanage K. Setting a framework for organisational sustainable development // Sustainable Production and Consumption. 2019. Vol. 20. P. 207–229. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.06.005>
4. Маринченко Т.Е. «Зеленая экономика» как условие устойчивого развития России. В кн.: Инновации природообустройства и защиты окружающей среды. Материалы I Национальной научно-практической конференции с международным участием, 2019. С. 361–367.
5. Пыльнева Т.Г., Александров Г.И., Качалов С.О. «Зеленая металлургия»: экономические аспекты совершенствования природопользования // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2018. № 1 (67). С. 37–47. <https://doi.org/10.17277/voprosy.2018.01.pp.037-047>
6. Pan W., Pan Wul., Hu C., Tu H., Zheng G. Assessing the green economy in China: An improved framework // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 209. No. 2. P. 680–691. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.267>
7. Khoshnava S.M., Rostami R., Zin R.M., Kamyab H., Mardani A., Abd Majida M.Z., Yousefpour A. Green efforts to link the economy and infrastructure strategies in the context of sustainable development // Energy. 2020. Vol. 193. Article 116759. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116759>
8. Шевелев Л.Н. Концепция устойчивого низкоуглеродного развития черной металлургии России на период 2020 – 2050 гг. В кн.: XV Международный конгресс сталеплавателей. Сборник трудов к 100-летию Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» и 380-летию российской металлургии, 2018. С. 17–20.
9. Liu X., Guo P., Nie L. Applying energy and decoupling analysis to assess the sustainability of China’s coal mining area // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 243. Article 118577. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118577>
10. Qian X., Wang D., Wang J., Chen S. Resource curse, environmental regulation and transformation of coal-mining cities in China // Resources Policy. 2021. Vol. 74. Article 101447. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101447>
11. Штанский В.А. Обеспечение устойчивого инновационного развития предприятий металлургического комплекса // Экономика промышленности. 2019. Т. 12. № 4. С. 466–472. <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2019-4-466-472>
12. Семенов В.В., Углов В.А. Совершенствование техники и технологии производства черных металлов – основной фактор устойчивого развития отрасли и повышения ее инвестиционной привлекательности // Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации. 2018. № 6 (1422). С. 3–13.
13. Боровикова М.Н. Экономический потенциал устойчивого развития предприятий черной металлургии России // Экономика и управление: анализ тенденций и перспектив развития. 2016. № 27. С. 196–202.
14. Аджимет Г.Х. Анализ стратегий конкурентоспособности и конкурентной среды российских металлургических компаний на мировом рынке. В кн.: Современный менеджмент и управление: тенденции и перспективы развития. Сборник научных трудов. Симферополь, 2020. С. 46–51.
15. Долгих Ю.А., Смородина Е.А. Оценка адаптационного потенциала российских компаний черной металлургии к условиям пандемии COVID-19 в контексте финансовой архитектуры их устойчивого развития // Финансовая экономика. 2021. № 11. С. 34–37.
1. Chernikova O.P. Formation of sustainable development reporting in Russian practice. *Ekonomika i finansy*. 2019, no. 7, pp. 55–65. (In Russ.).
2. Makhmadov N.R. Research of existing approaches to the analysis of sustainable development. *Ekonomika i predprinimatel'stvo*. 2020, no. 1 (114), pp. 782–786. (In Russ.).
3. Bastas A., Liyanage K. Setting a framework for organisational sustainable development. *Sustainable Production and Consumption*. 2019, vol. 20, pp. 207–229. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.06.005>
4. Marinchenko T.E. “Green economy” as a condition for sustainable development of Russia. In: *Innovations of Environmental Management and Protection. Materials of the 1st Nat. Sci. and Pract. Conf. with Int. Participation*, 2019, pp. 361–367. (In Russ.).
5. Pyl'neva T.G., Aleksandrov G.I., Kachalov S.O. “Green Metallurgy”: economic aspects of improving environmental management. *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo*. 2018, no. 1 (67), pp. 37–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.17277/voprosy.2018.01.pp.037-047>
6. Pan W., Pan Wul., Hu C., Tu H., Zheng G. Assessing the green economy in China: An improved framework. *Journal of Cleaner Production*. 2019, vol. 209, no. 2, pp. 680–691. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.267>
7. Khoshnava S.M., Rostami R., Zin R.M., Kamyab H., Mardani A., Abd Majida M.Z., Yousefpour A. Green efforts to link the economy and infrastructure strategies in the context of sustainable development. *Energy*. 2020, vol. 193, article 116759. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116759>
8. Shevelev L.N. Concept of sustainable low-carbon development of ferrous metallurgy in Russia for the period 2020–2050. In: *XV Int. Congress of Steelmakers. Proceedings on the 100th Anniversary of the National Research Technological University “MISIS” and the 380th Anniversary of Russian Metallurgy*, 2018, pp. 17–20. (In Russ.).
9. Liu X., Guo P., Nie L. Applying energy and decoupling analysis to assess the sustainability of China’s coal mining area. *Journal of Cleaner Production*. 2020, vol. 243, article 118577. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118577>
10. Qian X., Wang D., Wang J., Chen S. Resource curse, environmental regulation and transformation of coal-mining cities in China. *Resources Policy*. 2021, vol. 74, article 101447. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101447>
11. Shtansky V.A. Ensuring sustainable innovative development of the metallurgical complex enterprises. *Russian Journal of Industrial Economics*. 2019, vol. 12, no. 4, pp. 466–472. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/2072-1633-2019-4-466-472>
12. Semenov V.V., Uglov V.A. Upgrading of equipment and technology of ferrous metals production — main factor of stable development of the industry and increase of its investment attraction. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2018, no. 6 (1422), pp. 3–13. (In Russ.).
13. Borovikova M.N. Economic potential of sustainable development of Russian ferrous metallurgy enterprises. *Ekonomika i upravlenie: analiz tendentsii i perspektiv razvitiya*. 2016, no. 27, pp. 196–202. (In Russ.).
14. Adzhimet G.Kh. Analysis of competitiveness strategies and competitive environment of the Russian metallurgical companies in the world market. In: *Modern Management and Management: Trends and Prospects of Development. Collection of sci. papers. Simferopol*, 2020, pp. 46–51. (In Russ.).
15. Dolgikh Yu.A., Smorodina E.A. Assessment of adaptation potential of Russian ferrous metallurgy companies to the conditions of COVID-19 pandemic in context of financial architecture of their sustainable development. *Finansovaya ekonomika*. 2021, no. 11, pp. 34–37. (In Russ.).

16. Бейжанова А.Т., Ильяс А.Р. Устойчивое развитие черной металлургии в регионах Казахстана и его влияние на окружающую среду. В кн.: Актуальные тренды в экономике и финансах. Материалы международной научно-практической конференции. 2019. С. 11–16.
17. Шатоха В.И., Семенко С.А. Моделирование сценариев развития черной металлургии с учетом необходимости предотвращения изменения климата // Экология и промышленность. 2016. № 3 (48). С. 13–20.
18. 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>
19. 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>
20. Liu H., Li Q., Li G., Ding R. Life cycle assessment of environmental impact of steelmaking process // Complexity. 2020. Vol. 2020. Article 8863941. <https://doi.org/10.1155/2020/8863941>
21. Trovão R.S., Camillo L.D., da Silva G.A., Kulay L. Verifying the environmental and energy feasibility of potential improvement actions in the steel production chain in Brazil // Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. 2022. Vol. 10. No. 1. Article 1090390. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d9.0390>
22. Seppälä J., Koskela S., Melanen M., Palperi M. The Finnish metals industry and the environment // Resources Conservation and Recycling. 2002. Vol. 35. No. 1-2. P. 61–76. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(01\)00122-7](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00122-7)
23. Tongpool R., Jirajariyavech A., Yuvaniyama C., Mungcharoen T. Analysis of steel production in Thailand: Environmental impacts and solutions // Energy. 2010. Vol. 35. No. 10. P. 4192–4200. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.07.003>
24. Chisalita D.-A., Petrescu L., Cobden P.D., van Dijk H.A.J., Cormos A.-M., Cormos C.C. Assessing the environmental impact of an integrated steel mill with post-combustion CO<sub>2</sub> capture and storage using the LCA methodology // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 211. P. 1015–1025. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.11.256>
25. Liang T., Wang S., Lu C., Jiang N., Long W., Zhang M., Zhang R. Environmental impact evaluation of an iron and steel plant in China: Normalized data and direct/indirect contribution // Journal of Cleaner Production. 2020. vol. 264. Article 121697. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121697>
26. Huang Z., Ding X., Sun H., Liu S. Identification of main influencing factors of life cycle CO<sub>2</sub> emissions from the integrated steelworks using sensitivity analysis // Journal of Cleaner Production. 2010. Vol. 18. No. 10-11. P. 1052–1058. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.02.010>
27. Dorota B.-K. Significance of environmental life cycle assessment (LCA) method in the iron and steel industry // Metalurgija. 2011. Vol. 50. P. 205–208.
28. Norgate T.E., Jahanshahi S., Rankin W.J. Assessing the environmental impact of metal production processes // Journal of Cleaner Production. 2007. Vol. 15. No. 8-9. P. 838–848. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.06.018>
29. Benjamin N.I., Lin B. Quantile analysis of carbon emissions in China metallurgy industry // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 243. Article 118534. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118534>
30. Yilmaz O., Antcil A., Karanfil T. LCA as a decision support tool for evaluation of best available techniques (BATs) for cleaner production of iron casting // Journal of Cleaner Production. 2015. Vol. 105. P. 337–347. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.022>
31. Wu W., An S., Wu C.-H., Tsai S.-B., Yang K. An empirical study on green environmental system certification affects financing cost of high energy consumption enterprises-taking metallurgical enterpri-
16. Beizhanova A.T., Il'yas A.R. Sustainable development of ferrous metallurgy in the regions of Kazakhstan and its impact on the environment. In: *Current Trends in Economics and Finance. Materials of the Int. Sci. and Pract. Conf.* 2019, pp. 11–16. (In Russ.).
17. Shatokha V.I., Semenko S.A. Modeling scenarios for development of ferrous metallurgy according to the need to prevent climate changes. *Ekologiya i promyshlennost'*. 2016, no. 3 (48), pp. 13–20. (In Russ.).
18. 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. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-292-301>
19. 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>
20. Liu H., Li Q., Li G., Ding R. Life cycle assessment of environmental impact of steelmaking process. *Complexity*. 2020, vol. 2020, article 8863941. <https://doi.org/10.1155/2020/8863941>
21. Trovão R.S., Camillo L.D., da Silva G.A., Kulay L. Verifying the environmental and energy feasibility of potential improvement actions in the steel production chain in Brazil. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. 2022, vol. 10, no. 1, article 1090390. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d9.0390>
22. Seppälä J., Koskela S., Melanen M., Palperi M. The Finnish metals industry and the environment. *Resources Conservation and Recycling*. 2002, vol. 35, no. 1-2, pp. 61–76. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(01\)00122-7](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(01)00122-7)
23. Tongpool R., Jirajariyavech A., Yuvaniyama C., Mungcharoen T. Analysis of steel production in Thailand: Environmental impacts and solutions. *Energy*. 2010, vol. 35, no. 10, pp. 4192–4200. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.07.003>
24. Chisalita D.-A., Petrescu L., Cobden P.D., van Dijk H.A.J., Cormos A.-M., Cormos C.C. Assessing the environmental impact of an integrated steel mill with post-combustion CO<sub>2</sub> capture and storage using the LCA methodology. *Journal of Cleaner Production*. 2019, vol. 211, pp. 1015–1025. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.11.256>
25. Liang T., Wang S., Lu C., Jiang N., Long W., Zhang M., Zhang R. Environmental impact evaluation of an iron and steel plant in China: Normalized data and direct/indirect contribution. *Journal of Cleaner Production*. 2020, vol. 264, article 121697. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121697>
26. Huang Z., Ding X., Sun H., Liu S. Identification of main influencing factors of life cycle CO<sub>2</sub> emissions from the integrated steelworks using sensitivity analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2010, vol. 18, no. 10-11, pp. 1052–1058. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.02.010>
27. Dorota B.-K. Significance of environmental life cycle assessment (LCA) method in the iron and steel industry. *Metalurgija*. 2011, vol. 50, pp. 205–208.
28. Norgate T.E., Jahanshahi S., Rankin W.J. Assessing the environmental impact of metal production processes. *Journal of Cleaner Production*. 2007, vol. 15, no. 8-9, pp. 838–848. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.06.018>
29. Benjamin N.I., Lin B. Quantile analysis of carbon emissions in China metallurgy industry. *Journal of Cleaner Production*. 2020, vol. 243, article 118534. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118534>
30. Yilmaz O., Antcil A., Karanfil T. LCA as a decision support tool for evaluation of best available techniques (BATs) for cleaner production of iron casting. *Journal of Cleaner Production*. 2015, vol. 105, pp. 337–347. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.022>
31. Wu W., An S., Wu C.-H., Tsai S.-B., Yang K. An empirical study on green environmental system certification affects financing cost of high energy consumption enterprises-taking metallurgical enterpri-

- ses as an example // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 244. Article 118848. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118848>
32. Ertem M.E., Şen S., Akar G., Pamukçu Ç., Gurgun S. Specific energy consumption analysis of Turkish integrated steel plants and sustainable energy management in Erdemir // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2010. Vol. 32. No. 10. P. 931–941. <https://doi.org/10.1080/15567030903261865>
33. Kruzhanov V., Volker A. Energy consumption in powder metallurgical manufacturing // *Powder Metallurgy*. 2012. Vol. 55. P. 14–21. <https://doi.org/10.1179/174329012X13318077875722>
34. Xu M., Lin B., Wang S. Towards energy conservation by improving energy efficiency? Evidence from China's metallurgical industry // *Energy*. 2021. Vol. 216. Article 119255. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119255>
35. Lin B., Du Z. Promoting energy conservation in China's metallurgy industry // *Energy Policy*. 2017. Vol. 104. P. 285–294. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.02.005>
- ses as an example. *Journal of Cleaner Production*. 2020, vol. 244, article 118848. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118848>
32. Ertem M.E., Şen S., Akar G., Pamukçu Ç., Gurgun S. Specific energy consumption analysis of Turkish integrated steel plants and sustainable energy management in Erdemir. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2010, vol. 32, pp. 931–941. <https://doi.org/10.1080/15567030903261865>
33. Kruzhanov V., Volker A. Energy consumption in powder metallurgical manufacturing. *Powder Metallurgy*. 2012, vol. 55, pp. 14–21. <https://doi.org/10.1179/174329012X13318077875722>
34. Xu M., Lin B., Wang S. Towards energy conservation by improving energy efficiency? Evidence from China's metallurgical industry. *Energy*. 2021, vol. 216, article 119255. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119255>
35. Lin B., Du Z. Promoting energy conservation in China's metallurgy industry. *Energy Policy*. 2017, vol. 104, pp. 285–294. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.02.005>

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Оксана Петровна Черникова**, к.э.н., доцент, заведующий кафедрой экономики, учета и финансов, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0002-5410-6623  
**E-mail:** chernikovaop@yandex.ru

**Oksana P. Chernikova**, *Cand. Sci. (Economics)*, Assist. Prof., Head of the Chair of Economics, Accounting and Finance, Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0002-5410-6623  
**E-mail:** chernikovaop@yandex.ru

**Юлия Александровна Златицкая**, к.т.н., доцент, доцент кафедры экономики, учета и финансов, Сибирский государственный индустриальный университет  
**E-mail:** zlatitskaya@mail.ru

**Yulia A. Zlatitskaya**, *Cand. Sci. (Eng.)*, Assist. Prof. of the Chair of Economics, Accounting and Finance, Siberian State Industrial University  
**E-mail:** zlatitskaya@mail.ru

#### Вклад авторов

#### CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**О. П. Черникова** – концепция работы, разработка системы показателей оценки ресурсоэффективности металлургического производства, написание статьи.  
**Ю. А. Златицкая** – обзор литературы, анализ результатов, написание статьи.

**O. P. Chernikova** – concept of the work, development of a system of indicators for assessing the resource efficiency of metallurgical production, writing the text.  
**Yu. A. Zlatitskaya** – literature review, analysis of the results, writing the text.

Поступила в редакцию 31.01.2022  
После доработки 04.03.2022  
Принята к публикации 11.03.2022

Received 31.01.2022  
Revised 04.03.2022  
Accepted 11.03.2022

**Оригинальная статья**

УДК 669.168

DOI 10.17073/0368-0797-2022-6-399-405

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2320>

## ОЦЕНКА ВЯЗКОСТИ НИОБИЕВЫХ ОКСИДНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОМПЛЕКСНЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ

**О. В. Заякин, Р. Р. Шартдинов, А. Н. Сметанников, И. Н. Кель****И** Институт металлургии УрО РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

**Аннотация.** Показана актуальность разработки современных технологических решений по переработке используемых для производства комплексных ферросплавов ниобиевых рудных материалов отечественных месторождений. Необходимость разработки новых технологических процессов переработки вызвана тем, что при переходе на новые виды ниобиевых концентратов изменяются химический и фазовый составы исходных материалов, а, следовательно, это приводит к изменению состава и свойств продуктов плавки (как металлических, так и оксидных). При помощи электровибрационного вискозиметра изучены температурные зависимости вязкости и рассчитаны температуры кристаллизации оксидных расплавов системы  $Nb_2O_5-SiO_2-CaO-TiO_2-Al_2O_3$ . Составы исследуемых образцов соответствуют бесфосфористым ниобиевым шлакам, получение которых возможно карботермическим методом из черновых концентратов. Образцы получены методом сплавления оксидных материалов в высокотемпературной лабораторной электропечи. На основе полученных данных построены графические зависимости вязкость – температура. Экспериментально установлено, что оксидные расплавы, содержащие 15 – 26 %  $Nb_2O_5$ , по характерной зависимости вязкость – температура являются более «длинными» (имеющими широкий диапазон кристаллизации) и неблагоприятными. Повышение концентрации пентаоксида ниобия до 40 % переводит шлаки в разряд «коротких» (с высокой скоростью кристаллизации). Показано, что повышение концентрации оксида ниобия  $Nb_2O_5$  от 15 до 40 % приводит к снижению температуры кристаллизации расплавов на 200 °С и уменьшению вязкости расплавов с 1,32 до 0,24 Па·с при 1350 °С. Улучшение физико-химических характеристик оксидных расплавов при повышении концентрации пентаоксида ниобия может благоприятно отразиться на технико-экономических показателях производства ферросплавов.

**Ключевые слова:** металлургия, оксидный расплав, температура кристаллизации, вязкость, физико-химические характеристики, ферросплав

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 21-19-00252.

**Для цитирования:** Заякин О.В., Шартдинов Р.Р., Сметанников А.Н., Кель И.Н. Оценка вязкости ниобиевых оксидных систем для производства комплексных ферросплавов // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 6. С. 399–405.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-399-405>

Original article

## VISCOSITY OF NIOBIUM OXIDE SYSTEMS FOR PRODUCTION OF COMPLEX FERROALLOYS

**O. V. Zayakin, R. R. Shartdinov, A. N. Smetannikov, I. N. Kel'****I** Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (101 Amundsen Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

**Abstract.** The relevance of the development of modern technological solutions for the processing of niobium ore materials used for the production of complex ferroalloys of domestic deposits is shown. The need to develop new technological processes of processing is caused by the fact that when switching to new types of niobium concentrates, the chemical and phase compositions of the starting materials change, and, consequently, this leads to a change in the composition and properties of the melting products (both metallic and oxide). Using an electrovibration viscometer, the temperature dependences of viscosity were studied and the crystallization temperatures of oxide melts of the  $Nb_2O_5-SiO_2-CaO-TiO_2-Al_2O_3$  system were calculated. The compositions of the studied samples correspond to phosphorless niobium slags, which can be obtained by carbothermic method from rough concentrates. The samples were obtained by fusing oxide materials in a high-temperature laboratory electric furnace. On the basis of the obtained data, graphical dependences of viscosity – temperature are constructed. It was experimentally established that oxide melts containing 15 – 26 %  $Nb_2O_5$  are more “long” (having a wide crystallization range) and unfavorable according to the characteristic viscosity – temperature dependence. An increase in the concentration of niobium pentoxide to 40 % translates slags into the category of “short” (with a high crystallization rate). It is shown that an increase in the concentration of niobium oxide  $Nb_2O_5$  from 15 to 40 % leads to a decrease in the crystallization temperature of melts by 200 °С and a decrease in the viscosity of melts from 1.32 to 0.24 Pa·s at 1350 °С. The improvement of the physico-chemical characteristics of oxide melts with an increase in the concentration of niobium pentoxide can favorably affect the technical and economic indicators of ferroalloy production.

**Keywords:** metallurgy, oxide melt, niobium, crystallization temperature, viscosity, physicochemical characteristics, ferroalloy

**Funding:** The research was supported by the grant No. 21-19-00252 of the Russian Science Foundation.

**For citation:** Zayakin O.V., Shartdinov R.R., Smetannikov A.N., Kel' I.N. Viscosity of niobium oxide systems for production of complex ferroalloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 6, pp. 399–405. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-399-405>

## ВВЕДЕНИЕ

Около 90 % ниобия потребляется сталеплавильной промышленностью в виде ферросплава (феррониобий, 60 – 65 % Nb). В настоящее время Россия по уровню производства и потребления ниобия отстает от многих стран с развитой экономикой. Феррониобий является остродефицитным товаром, потребности в котором удовлетворяются за счет импорта (как в виде феррониобия, так и в виде трубной и иной ниобийсодержащей продукции). В качестве легирующей добавки ниобий заменяет более дорогие элементы [1]. В настоящее время основными факторами, определяющими рынок ниобия, являются увеличение его потребления в сталях конструкционных марок и широкое использование сплавов на основе ниобия в производстве авиационных двигателей<sup>1</sup> [2].

Мировой рынок ниобиевых продуктов, выросший за последние 25 лет в 4,3 раза, характеризуется абсолютным доминированием бразильской компании «Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineracao» (СВММ), которая осуществляет 86 % мирового производства накопленного ниобиевого сырья. Разработка крупнейшего в мире месторождения ниобия Араша с высококачественными и технологичными пироклоровыми рудами (среднее содержание Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 2,5 %) и отлаженное производство с добычей до 54 тыс. т Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/год позволяют СВММ удерживать монопольную позицию, препятствуя выходу на рынок ниобия новых участников [3 – 5].

В России практически все производство ниобия и тантала базируется на лопаритовых рудах Лавозёрского месторождения, характеризующихся низкими содержаниями ниобия и тантала в рудах (0,24 % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 0,014 % Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) и концентратах (около 8 % и 0,8 – 1,5 % соответственно), неблагоприятными горно-геологическими условиями отработки (подземная добыча). Получаемые из лопаритовых концентратов на «Соликамском магниевом заводе» методом хлорирования технический пентаоксид и гидроксид ниобия (около 500 т в год) используются для производства феррониобия стандартных марок на «Ключевском заводе ферросплавов» и (частично) направляются в Казахстан на «Ульбинский металлургический завод» (г. Усть-Каменогорск). Возобновлены поставки гидроксида ниобия в Эстонию (г. Силлимяэ), где из него производят феррониобий

и сплавы Nb–Ni. Попытка ЗАО «Стальмаг» вовлечь в промышленное освоение Татарское месторождение (Красноярский край) (0,6 % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> в апатит-пироклоровых рудах коры выветривания карбонатитов) оказалась неудачной из-за низких показателей извлечения пироклора в концентраты, необходимости их кондиционирования (обесфосфоривания). В связи с этим в 2011 г. работы на этом месторождении были прекращены.

Российские источники ниобиевого сырья характеризуются существенными минерально-технологическими отличиями от импортных руд и друг от друга. По данным работы [6] перспективные промышленные источники этого сырья можно разделить на три группы:

- объекты ускоренного освоения: Татарское месторождение (Красноярский край), представлено промышленными минералами: пироклор, апатит и вермикулит; Салланлатва (Мурманская обл.), минералы: луешит, барит;

- объекты комплексного промышленного освоения с попутным пироклором: Катугинское месторождение (Читинская область), минералы: гагаринит, пироклор, колумбит, циркон, криолит;

- объекты суперкрупные и крупные с ведущей пироклоровой специализацией и природнолегированными рудами: месторождения Томторское (Саха-Якутия) (пироклор, монацит, крадаллит и др.); Большетагнинское (Иркутская обл.) (пироклор, апатит); Белозиминское (Иркутская обл.) (пироклор, апатит, колумбит, монацит).

Концентрация Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> в отечественных рудах колеблется в пределах от 0,1 до 1 %, также в них содержатся в различных количествах фосфор, торий и другие элементы. При обогащении руд этих месторождений получают концентраты разного состава, содержащие от 15 – 25 до 40 – 50 % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, до 10 – 15 % оксида фосфора.

В связи с этим возникают задачи по разработке для каждого вида рудного сырья эффективных процессов получения ниобиевых ферросплавов приемлемого для сталеплавильщиков состава.

По данным работы [1] основные промышленные и потенциально-промышленные типы месторождений ниобия в России характеризуются высоким содержанием фосфора. Использование такого сырья при получении кондиционных концентратов для производства феррониобия вызывает необходимость применения сложных многостадийных процессов обогащения. В связи с этим становится нерентабельным, а в ряде случаев невозможным получение стандартных марок феррониобия по существующим технологическим схемам. В России продолжают работы по оценке запа-

<sup>1</sup> Biesheuvel T., Riseborough J. The commodity that no one knows about but everybody wants to buy. Bloomberg, 2020. URL: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-05-17/the-commodity-that-no-one-knows-about-but-everybody-wants-to-buy> (Дата обращения 21.10.2021)

сов, отработке технологий, технико-экономической оценке и ранжированию освоения отдельных участков и месторождений в целом [7, 8].

Химическая технология переработки ниобиевых концентратов сопряжена с рядом особенностей, обусловленных низким содержанием ниобия в рудах, сложным составом минералов и руд, тонкой вкрапленностью и рассеянностью. Это обуславливает выбор сложных технологических схем при переработке рудных концентратов.

При переходе на новые виды ниобиевых концентратов изменяются химический и фазовый составы исходных материалов, а, следовательно, и условия протекания восстановительных процессов, что приводит к изменению состава и свойств продуктов плавки (как металлических, так и оксидных) [9–11]. Образуется шлак нового состава, который обладает другими физико-химическими характеристиками. Изучение характеристик ниобийсодержащих оксидных систем проведено в ряде работ [12–16], однако имеющихся в литературе данных недостаточно для глубокого понимания зависимости физико-химических характеристик от химического и фазового составов оксидных расплавов, образующихся при переработке черновых ниобиевых концентратов. К сожалению, отсутствие широкомасштабных исследований свойств образующихся оксидных расплавов зачастую не позволяет поддерживать рациональный шлаковый режим плавки, что приводит к уменьшению степени извлечения основных компонентов и снижению технико-экономических показателей производства новых ферросплавов [17]. В связи с этим для разработки эффективного способа переработки отечественных ниобиевых рудных материалов необходимо изучение состава и физико-химических характеристик оксидных расплавов, которые образуются при карботермическом процессе получения бесфосфористых ниобиевых шлаков.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В лабораторных условиях синтетическим методом получены образцы оксидных материалов системы  $Nb_2O_5-SiO_2-CaO-TiO_2-Al_2O_3$ . Химический состав опытных образцов представлен в таблице.

Изучено влияние концентрации  $Nb_2O_5$  на вязкость и температуру кристаллизации шлаков. Вязкость является

одним из основных параметров, характеризующих физические свойства оксидных расплавов [18]. Вязкость жидкости определяется межчастичным взаимодействием, поэтому ее изучение (наряду с другими физико-химическими свойствами [19, 20]) позволяет оценить строение шлаковых расплавов и их природу. Вязкость шлаков и металлов в значительной мере определяет скорость различных физико-химических процессов и особенно диффузионных явлений в расплавах [21]. В ряде случаев вязкость шлака определяет работоспособность металлургических агрегатов, в частности, обуславливает такие явления, как взаимодействие шлака с огнеупорами, потери металла со шлаком и др.

В настоящей работе вязкость образцов шлака измеряли на электровибрационном вискозиметре в молибденовых тиглях в токе аргона. Высокая чувствительность вибрационного вискозиметра обусловлена тем, что он работает на резонансных колебаниях, а вязкость расплава нарушает условия резонанса [22, 23].

Для фиксации изменения напряжения (вязкости расплава) использовали цифровой вольтметр, включенный параллельно измерительной катушке. Его показания пропорциональны амплитуде и частоте колебаний измерительной катушки. Исследования проводили при непрерывном охлаждении расплава со скоростью 1–3 °C/мин. до полной кристаллизации или достижения значений вязкости 9–10 Па·с в зависимости от кристаллизационной способности шлака.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость вязкости ( $\eta$ ) оксидных расплавов системы  $Nb_2O_5-SiO_2-CaO-TiO_2-Al_2O_3$  от температуры ( $T$ ) и концентрации  $Nb_2O_5$  представлена на рис. 1 (номера кривых соответствуют номерам образцов в таблице).

Кривая для образца 3 (рис. 1) представляет наиболее «короткий» шлак, который быстро кристаллизуется. Рентгенофазовые исследования, выполненные на оборудовании ЦКП Урал-М, показали присутствие в образце 3 большого количества аморфной фазы, затрудняющей изучение его фазового состава.

Изучение фазового состава рентгеноспектральным способом не позволило определить присутствующие в нем фазы, поэтому выполнен микрорентгеноспектральный анализ (МРСА) и изучены фазовые диаграммы

### Химический состав и температура кристаллизации ниобийсодержащих образцов

#### Chemical composition and crystallization temperature of niobium-containing samples

Образец	Содержание, % (по массе)					Основность	Температура кристаллизации, °C
	SiO <sub>2</sub>	CaO	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
1	34,33	40,72	15,39	5,24	4,32	1,19	1260
2	29,39	36,78	25,75	4,66	3,42	1,25	1190
3	23,55	29,78	40,15	3,60	2,92	1,26	1060

мы состояния системы  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Nb}_2\text{O}_5$ . Обнаружено присутствие ниобатов кальция ( $\text{Ca}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ ,  $\text{CaNb}_2\text{O}_6$ ,  $\text{Ca}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ ), псевдоволластонита ( $\text{CaSiO}_3$ ) и оксида кремния, что коррелирует с литературными данными [14, 16]. Присутствующие в образце оксиды  $\text{TiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  являются амфотерными. Согласно литературным данным [24, 25], они имеют разнонаправленное действие, которое нивелируется из-за их близкой концентрации.

Образец 3 при перегреве выше  $1250^\circ\text{C}$  характеризуется вязкостью  $0,2-0,3$  Па·с, но после достижения температуры ликвидуса ( $1060^\circ\text{C}$ ) резко загущается.

Таким образом можно сделать вывод о том, что шлак с повышенным содержанием пентаоксида ниобия имеет узкий диапазон кристаллизации и относится к разряду «коротких» шлаков.

Снижение концентрации ниобия в исследуемых образцах переводит их в разряд «длинных», то есть шлаки с широким интервалом кристаллизации. Они более вязкие и, не кристаллизуясь, застывают в стекло (рис. 1, кривые 1 и 2) [26]. В связи с этим характер кривых  $\eta - T$  для шлаков 1 и 2 более плавный, а для образца 3 участок перегиба выражен четче. У образцов 1 и 2 при охлаждении вязкость повышается медленно. В шлаке 1 присутствует тугоплавкое соединение  $\text{Ca}_4\text{Nb}_2\text{O}_9$ , чем и объясняется более высокая температура кристаллизации и характер кривой зависимости вязкости от температуры.

С точки зрения практики ферросплавного производства наиболее благоприятны «короткие» шлаки, которые должны обладать свойствами быстрого снижения вязкости при достижении определенных температур, что исключает образование пластичного состояния вещества, затрудняющего перемещение газов и растягивающего зону шлакообразования по высоте печи.

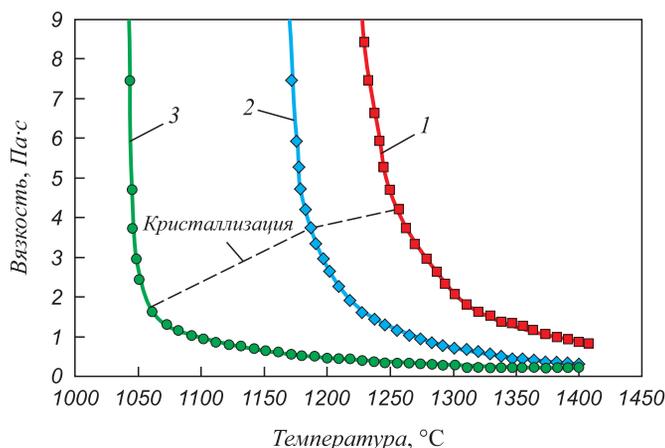


Рис. 1. Зависимость вязкости оксидных расплавов системы  $\text{Nb}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$  от температуры и концентрации  $\text{Nb}_2\text{O}_5$

Fig. 1. Dependence of viscosity of oxide melts of  $\text{Nb}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$  system on temperature and  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  concentration

Образцы шлаков 1 и 2 возможно перевести в разряд «коротких», например, за счет увеличения их основности добавками извести. Однако добавки  $\text{CaO}$  приведут к значительному увеличению количества шлака. Необходимо заметить, что при использовании образцов 1 и 2 с пониженной концентрацией базового компонента ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ) кратность шлака становится существенно выше, чем у образца 3. Поэтому даже небольшое повышение основности приведет к резкому увеличению количества шлака. На практике стремятся получить минимальное количество шлака, так как увеличение его кратности приводит к росту расхода электроэнергии и продолжительности плавки.

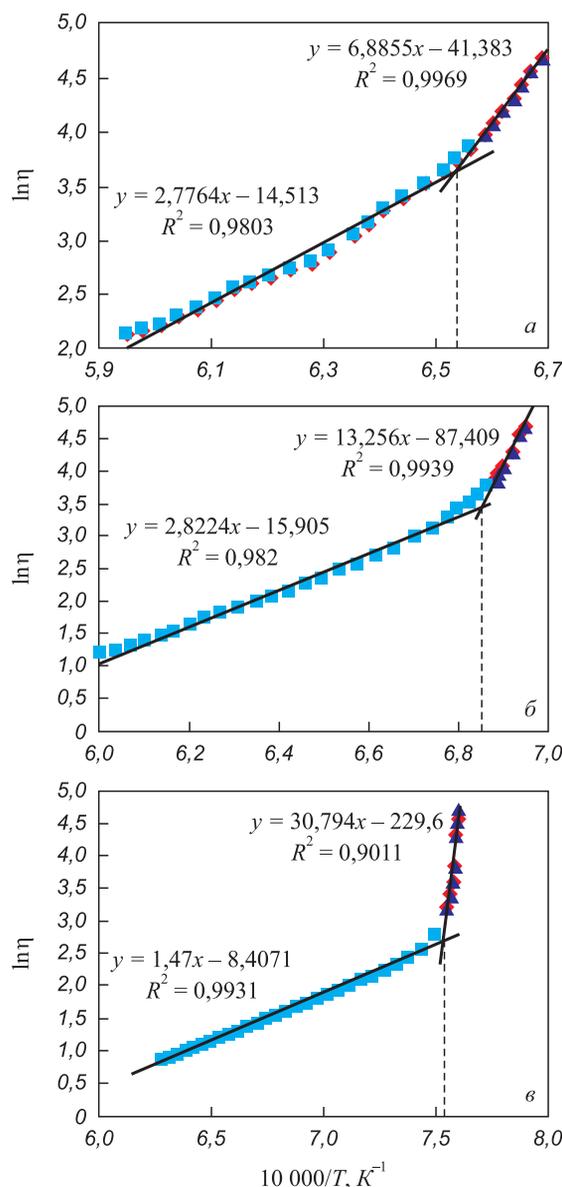


Рис. 2. Зависимость  $\ln \eta$  оксидных расплавов системы  $\text{Nb}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$  от  $T^{-1}$  и концентрации  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  образцов 1–3 (а–в)

Fig. 2. Dependence of  $\ln \eta$  of oxide melts of  $\text{Nb}_2\text{O}_5 - \text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$  system on  $T^{-1}$  and  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  concentration of the samples 1–3 (a–в)

В связи с более или менее резким изменением свойств системы при пересечении линии ликвидуса в процессе охлаждения (в том числе и изменения вязкости) существует возможность определения температуры кристаллизации шлака по характеру перелома кривых в координатах  $\lg \eta - T^{-1}$  (рис. 2). Данному перелому соответствует температура начала кристаллизации. Методика определения температуры кристаллизации подробно описана в работе [23]. Основанием для такого заключения являются обнаруженные экспериментально и выведенные на основе молекулярно-кинетических теорий уравнения, связывающие вязкость жидкостей с их температурой [26]. Зависимости  $\lg \eta$  изучаемых оксидных расплавов от  $T^{-1}$  с определением точек перелома линий представлены на рис. 2. Температуры кристаллизации изучаемых шлаков представлены в таблице.

При производстве ферросплавов температура кристаллизации шлака имеет большое значение, в рудно-термических печах она определяет температуру процесса. Температура кристаллизации не должна быть слишком высокой, чтобы не происходило перерасхода электроэнергии на нагрев и плавление тугоплавкого шлака, а также излишнего расхода огнеупорных материалов.

Вязкость шлаков оказывает большое влияние на распределение элементов между металлической и шлаковой фазами. Низкая вязкость шлаков необходима для полной коагуляции металлических частиц в сплаве.

В густых оксидных расплавах скорость оседания мелких королек металла слишком мала, что приводит к нежелательным потерям металла со шлаком. Это особенно актуально при выплавке малофосфористого ниобиевого шлака из-за его высокой кратности. Высокая вязкость шлаков также может приводить к образованию гарнисажа, сокращению рабочего пространства печи, вызывать трудности вскрытия леток и удаления продуктов плавки. Повышение концентрации оксида  $Nb_2O_5$  в шлаках при прочих равных условиях приводит к существенному снижению вязкости расплавов. Шлак 3 обладает наименьшей вязкостью (0,24 Па·с при 1350 °С) по сравнению с остальными изученными шлаками.

## Выводы

Исследованы вязкость и температура кристаллизации оксидных расплавов системы  $Nb_2O_5 - SiO_2 - CaO - TiO_2 - Al_2O_3$ . Повышение концентрации оксида  $Nb_2O_5$  от 15 до 40 % приводит к снижению температуры кристаллизации расплавов на 200 °С, к переходу шлаков из разряда «длинных» в «короткие», к снижению вязкости расплавов с 1,32 до 0,24 Па·с при 1350 °С.

Улучшение физико-химических характеристик оксидных расплавов при повышении концентрации пентаоксида ниобия может благоприятно отразиться на технико-экономических показателях производства ферросплавов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Нечаев А.В., Поляков Е.Г., Белоусова Е.Б., Пикалова В.С., Бычковский Л.З. Минерально-сырьевая база ниобия России: приоритеты освоения // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2020. № 4-5. С. 8–15.
2. Никишина Е.Е., Дробот Д.В., Лебедева Е.Н. Ниобий и тантал: состояние мирового рынка, области применения, сырьевые источники. Часть 2 // Известия вузов. Цветная металлургия. 2014. № 1. С. 29–41.
3. Боярко Г.Ю. Динамика мирового производства и товарных потоков ниобиевого сырья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 10. С. 216–229. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/10/2318>
4. Paraiso-Fo O.D.S., Fuccio R., Betz E.W. Mining, ore preparation and niobium based materials production at Araxa, Brazil // High Temperature Materials and Processes. 1993. Vol. 11. No. 1-4. P. 119–138.
5. Dufresne C., Goyette G. The production of ferroniobium at the Niobec mine. Niobium, Science and Technology // Int. Symp. Niobium 2001. Orlando, FL, United States. 2001. Code 62351. P. 29–35.
6. Мелентьев Г.Б. Перспективы обеспечения собственным редкометальным сырьем и развития производств феррониобия в России. В кн.: Труды конференции «Перспективы развития металлургии и машиностроения»: ФЕРРОСПЛАВЫ. Екатеринбург: ООО изд. «АльфаПринт», 2018. С. 36–45.
7. Стулов П.Е., Серегин А.Н., Пикалова В.С. Разработка технологии выплавки феррониобия и ниобийсодержащих сплавов из концентратов руд Большетагнинского месторождения // Проблемы черной металлургии и материаловедения. 2012. № 4. С. 5–11.
1. Nechaev A.V., Polyakov E.G., Belousova E.B., Pikalova V.S., Bykhovskii L.Z. Mineral resource base of niobium in Russia: Development priorities. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*. 2020, no. 4-5, pp. 8–15. (In Russ.).
2. Nikishina E.E., Drobot D.V., Lebedeva E.N. Niobium and tantalum: State of the world market, application fields, and sources of raw materials. Part 2. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2014, vol. 55, no. 2, pp. 130–140. <https://doi.org/10.3103/S1067821214020126>
3. Boyarko G.Yu. Dynamics of global production and commodity flows of niobium raw materials. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. 2019, vol. 330, no. 10, pp. 216–229. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/10/2318>
4. Paraiso-Fo O.D.S., Fuccio R., Betz E.W. Mining, ore preparation and niobium based materials production at Araxa, Brazil. *High Temperature Materials and Processes*. 1993, vol. 11, no. 1-4, pp. 119–138.
5. Dufresne C., Goyette G. The production of ferroniobium at the Niobec mine. Niobium, Science and Technology. In: *Int. Symp. Niobium 2001. Orlando, FL, United States*. 2001, code 62351, pp. 29–35.
6. Melent'ev G.B. Prospects for providing own rare metal raw materials and development of ferroniobium production in Russia. In: *Proceedings of the Conf. "Prospects for the Development of Metallurgy and Mechanical Engineering"*. FERRO-ALLOYS. Yekaterinburg: Al'faPrint, 2018, pp. 36–45. (In Russ.).
7. Stulov P.E., Seregin A.N., Pikalova V.S. Development of technology for smelting ferroniobium and niobium-containing alloys from ore concentrates of the Bolshetagninsky deposit. *Problemy chernoy metallurgii i materialovedeniya*. 2012, no. 4, pp. 5–11. (In Russ.).

8. Пикалова В.С. Геолого-экономическая оценка нового потенциально-промышленного типа ниобиевых руд на примере Болшектагинского месторождения. Автореф. дисс. .... канд. техн. наук. М., 2017. 18 с.
9. Zhuckov V.I., Zayakin O.V., Mikhailova L.Yu. Obtaining of niobium-containing ferroalloys from the Russian ore raw materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 966. Article 012037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012037>
10. Yessengaliyev D., Baisanov S., Issagulov A., Zayakin O., Abdirashit A. Thermodynamic diagram analysis (TDA) of MnO–CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> and phase composition of slag in refined ferromanganese production // Metalurgija. 2019. Vol. 58. No. 3-4. P. 291–294.
11. Akuov A., Samuratov Y., Kelamanov B., Zhumagaliyev Y., Taizhigitova M. Development of an alternative technology for the production of refined ferrochrome // Metalurgija. 2020. Vol. 59. No. 4. P. 529–532.
12. Ma Zh., Zhao Z., Guo W., Wang Zh. Influence of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and basicity on the viscosity and structure of CaO–SiO<sub>2</sub>–Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–CeO<sub>2</sub>–CaF<sub>2</sub> slag system // Metallurgical Research and Technology. 2020. Vol. 117. No. 3. Article 307. <https://doi.org/10.1051/metal/2020023>
13. Истомин С.А., Красиков С.А., Пастухов Э.А., Рябов В.В. Влияние ниобийсодержащих добавок на вязкость и электропроводность оксидно-фторидных расплавов // Металлы. 2006. № 2. С. 44–49. <https://doi.org/10.1134/S0036029506020054>
14. Ibrahim M., Bright Norman F.H. The binary system Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – SiO<sub>2</sub> // Journal of the American Ceramic Society. 2006. Vol. 45. No. 5. P. 221–222. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1962.tb11130.x>
15. Ibrahim M., Bright Norman F.H., Rowland J.F. The binary system CaO – Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> // Journal of the American Ceramic Society. 2006. Vol. 45. No. 7. P. 329–334. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1962.tb11161.x>
16. Liu C., Qiu J., Sun L. Liquidus and phase equilibrium in CaO–SiO<sub>2</sub>–Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–10 % La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system // ISIJ International. 2018. Vol. 58. No. 4. P. 612–619. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-569>
17. Kim A.S., Заякин О.В., Акбердин А.А., Концевой Ю.В. Получение и применение новых комплексных борсодержащих ферросплавов // Электromеталлургия. 2009. № 12. С. 21–24.
18. Sariev O., Kim S., Zhumagaliev Y., Kelamanov B., Sultanov M., Nurgali N. Viscosity and crystallization temperature of ferroalloy slags from Kazakhstan ore // Metalurgija. 2020. Vol. 59. No. 4. P. 525–528.
19. Жучков В.И., Заякин О.В., Леонтьев Л.И., Есенжулов А.Б., Островский Я.И. Основные направления переработки бедного отечественного хромородного сырья // Электromеталлургия. 2008. № 5. С. 18–21.
20. Заякин О.В., Жучков В.И., Лозовая Е.Ю. Время плавления никельсодержащих ферросплавов в стали // Известия вузов. Черная металлургия. 2007. № 5. С. 13–16.
21. Физико-химические методы исследования металлургических процессов / П.П. Арсентьев, В.В. Яковлев, М.Г. Крашенинников, Л.А. Пронин. М.: Металлургия, 1988. 511 с.
22. Штенгельмейер С.В., Прусов В.А., Бочегов В.А. Усовершенствование методики измерения вязкости вибрационным вискозиметром // Заводская лаборатория. 1985. Т. 51. № 9. С. 56–57.
23. Акбердин А.А. Избранные труды. Караганда: ПК «Экожан», 2008. 754 с.
24. Park H., Park J.-Y., Kim G.H., Sohn I. Effect of TiO<sub>2</sub> on the viscosity and slag structure in blast furnace type slags // Steel Research International. 2012. Vol. 83. No. 2. P. 150–156. <https://doi.org/10.1002/srin.201100249>
25. Kim Y., Min D.-J. Viscosity and structural investigation of high-concentration Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and MgO slag system for FeO reduction in electric arc furnace processing // Metals. 2021. Vol. 11. No. 8. Article 1169. <https://doi.org/10.3390/met11081169>
26. Воскобойников В.Г., Дунаев Н.Е., Михалевиц А.Г. Свойства жидких доменных шлаков. М.: Металлургия, 1975. 184 с.
8. Pikalova V.S. Geological and economic assessment of a new potentially industrial type of niobium ores on the example of the Bolshektagninsky deposit: Extended Abstract of Cand. Sci. Diss. Moscow, 2017, 18 p. (In Russ.).
9. Zhuckov V.I., Zayakin O.V., Mikhailova L.Yu. Obtaining of niobium-containing ferroalloys from the Russian ore raw materials. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 966, article 012037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012037>
10. Yessengaliyev D., Baisanov S., Issagulov A., Zayakin O., Abdirashit A. Thermodynamic diagram analysis (TDA) of MnO–CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> and phase composition of slag in refined ferromanganese production. Metalurgija. 2019, vol. 58, no. 3-4, pp. 291–294.
11. Akuov A., Samuratov Y., Kelamanov B., Zhumagaliyev Y., Taizhigitova M. Development of an alternative technology for the production of refined ferrochrome. Metalurgija. 2020, vol. 59, no. 4, pp. 529–532.
12. Ma Zh., Zhao Z., Guo W., Wang Zh. Influence of Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and basicity on the viscosity and structure of CaO–SiO<sub>2</sub>–Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–CeO<sub>2</sub>–CaF<sub>2</sub> slag system. Metallurgical Research and Technology. 2020, vol. 117, no. 3, article 307. <https://doi.org/10.1051/metal/2020023>
13. Istomin S.A., Krasikov S.A., Pastukhov E.A., Ryabov V.V. Effect of niobium-containing additions on the viscosity and electrical conductivity of oxide-fluoride melts. Russian Metallurgy (Metally). 2006, vol. 2006, no. 2, pp. 133–137. <https://doi.org/10.1134/S0036029506020054>
14. Ibrahim M., Bright Norman F.H. The binary system Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – SiO<sub>2</sub>. Journal of the American Ceramic Society. 2006, vol. 45, no. 5, pp. 221–222. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1962.tb11130.x>
15. Ibrahim M., Bright Norman F.H., Rowland J.F. The binary system CaO – Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Journal of the American Ceramic Society. 2006, vol. 45, no. 7, pp. 329–334. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1962.tb11161.x>
16. Liu C., Qiu J., Sun L. Liquidus and phase equilibrium in CaO–SiO<sub>2</sub>–Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>–10 % La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system. ISIJ International. 2018, vol. 58, no. 4, pp. 612–619. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-569>
17. Kim A.S., Zayakin O.V., Akberdin A.A., Kontsevoi Yu.V. Production and application of new complex boron-containing ferroalloys. Elektrometallurgiya. 2009, no. 12, pp. 21–24. (In Russ.).
18. Sariev O., Kim S., Zhumagaliev Y., Kelamanov B., Sultanov M., Nurgali N. Viscosity and crystallization temperature of ferroalloy slags from Kazakhstan ore. Metalurgija. 2020, vol. 59, no. 4, pp. 525–528.
19. Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Leont'ev L.I., Esenzhulov A.B., Ostrovskiy Ya.I. The main directions of processing of poor domestic chromium ore raw materials. Elektrometallurgiya. 2008, no. 5, pp. 18–21. (In Russ.).
20. Zayakin O.V., Zhuchkov V.I., Lozovaya E.Yu. Melting time of nickel-containing ferroalloys in steel. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2007, no. 5, pp. 13–16. (In Russ.).
21. Arsent'ev P.P., Yakovlev V.V., Krashennikov M.G., Pronin L.A. Physico-Chemical Methods for the Study of Metallurgical Processes. Moscow: Metallurgiya, 1988, 511 p. (In Russ.).
22. Shtengel'meier S.V., Prusov V.A., Bochegov V.A. Improvement of the viscosity measurement technique with a vibrating viscometer. Zavodskaya laboratoriya. 1985, vol. 51, no. 9, pp. 56–57. (In Russ.).
23. Akberdin A.A. Selected Works. Karaganda: PK "Ekozhan", 2008, 754 p.
24. Park H., Park J.-Y., Kim G.H., Sohn I. Effect of TiO<sub>2</sub> on the viscosity and slag structure in blast furnace type slags. Steel Research International. 2012, vol. 83, no. 2, pp. 150–156. <https://doi.org/10.1002/srin.201100249>
25. Kim Y., Min D.-J. Viscosity and structural investigation of high-concentration Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and MgO slag system for FeO reduction in electric arc furnace processing. Metals. 2021, vol. 11, no. 8, article 1169. <https://doi.org/10.3390/met11081169>
26. Voskoboinikov V.G., Dunaev N.E., Mikhalevich A.G. Properties of Liquid Blast Furnace Slags. Moscow: Metallurgiya, 1975, 184 p. (In Russ.).

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Олег Вадимович Заякин**, д.т.н., главный научный сотрудник, заведующий лабораторией стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0002-9442-5928

E-mail: zferro@mail.ru

**Руслан Рафикович Шартдинов**, младший научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0003-0852-1161

E-mail: rr.shartdinov@gmail.com

**Артём Николаевич Сметанников**, младший научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0001-9206-0905

E-mail: artem.smetannikov.89@mail.ru

**Илья Николаевич Кель**, научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН

ORCID: 0000-0001-6411-6932

E-mail: dunnington@mail.ru

**Oleg V. Zayakin**, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Head of the Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

ORCID: 0000-0002-9442-5928

E-mail: zferro@mail.ru

**Ruslan R. Shartdinov**, Junior Researcher of Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

ORCID: 0000-0003-0852-1161

E-mail: rr.shartdinov@gmail.com

**Artem N. Smetannikov**, Junior Researcher of Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

ORCID: 0000-0001-9206-0905

E-mail: artem.smetannikov.89@mail.ru

**Ilya N. Kel'**, Research Associate of Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

ORCID: 0000-0001-6411-6932

E-mail: dunnington@mail.ru

## ВКЛАД АВТОРОВ

## CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**О. В. Заякин** – выбор объекта и методики исследования, обсуждение результатов, корректировка и написание статьи.

**Р. Р. Шартдинов** – проведение экспериментов, написание статьи, подготовка графиков.

**А. Н. Сметанников** – проведение экспериментов.

**И. Н. Кель** – подготовка образцов для экспериментов, анализ полученных данных, корректировка статьи и графиков, корреспонденции с редакцией.

**O. V. Zayakin** – selection of the object and methodology of the research, discussion of the results, correction and writing of the article.

**R. R. Shartdinov** – conducting the experiments, writing the article, preparing the graphs.

**A. N. Smetannikov** – conducting the experiments.

**I. N. Kel'** – preparation of the experimental samples, analysis of the data obtained, correction of the article and graphs.

Поступила в редакцию 21.10.2021

После доработки 15.03.2022

Принята к публикации 26.05.2022

Received 21.10.2021

Revised 15.03.2022

Accepted 26.05.2022

ПО МАТЕРИАЛАМ КОНФЕРЕНЦИИ  
«МЕТАЛЛУРГИЯ – 2021»BASED ON THE MATERIALS OF THE CONFERENCE  
“METALLURGY – 2021”

Оригинальная статья

УДК 661.632.71

DOI 10.17073/0368-0797-2022-6-406-412

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2321>

## ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ БЕСФТОРИСТЫХ ШЛАКОВ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В КОВШЕВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ СТАЛИ

А. А. Бабенко<sup>1</sup>, Л. А. Смирнов<sup>1</sup>, Е. В. Протопопов<sup>2</sup>,  
А. Г. Уполовникова<sup>1</sup>, А. Н. Сметанников<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт металлургии УрО РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

<sup>2</sup> Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

**Аннотация.** Выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований зависимости вязкости, коэффициентов распределения серы и бора между шлаком и металлом, степени износа периклазоуглеродистого огнеупора от основности и содержания оксида бора в шлаке. Показано, что формируемые шлаки в диапазоне основности 2,0 – 5,0 характеризуются достаточно высокой жидкоподвижностью. Эти шлаки имеют повышенный до 5 – 20 равновесный межфазный коэффициент распределения серы, который обеспечивает пониженное до 0,001 – 0,005 % равновесное содержание серы в металле. Результаты фундаментальных исследований физико-химических свойств рафинировочных шлаков системы CaO–SiO<sub>2</sub>–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MgO легли в основу разработки состава экологически чистых бесфтористых ковшевых шлаков и технологических приемов их формирования на установке ковш – печь. Рекомендованный состав экологически чистых ковшевых шлаков низкой вязкости, обеспечивающих глубокую десульфурацию металла, прямое микролегирование стали бором и низкое агрессивное воздействие на периклазоуглеродистые огнеупоры, предусматривает формирование шлаков основностью 3,0 – 4,0, содержащих 1 – 4 % B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 15 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 8 % MgO. Формирование экологически чистых ковшевых шлаков рекомендованного состава осуществлен на установке ковш – печь загрузкой в сталеразливочный ковш извести, борсодержащего материала – колеманита (Турция), содержащего 39 – 41 % B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 26 – 28 % CaO, не более 5 % SiO<sub>2</sub> и 3 % MgO, и пирамидального алюминия для раскисления шлака и восстановления бора. Внедрение разработанной технологии формирования ковшевых шлаков рекомендованного состава обеспечило производство экономно легированных низкоуглеродистых конструкционных борсодержащих сталей с низким содержанием серы, в том числе для производства труб большого диаметра с высокими прочностными свойствами.

**Ключевые слова:** вязкость, оксид бора, стабилизация шлаков, распределение серы, термодинамическое моделирование, периклазоуглеродистые огнеупоры, предел текучести, временное сопротивление

**Финансирование:** Исследование выполнено в рамках Государственного задания ИМЕТ УрО РАН.

**Для цитирования:** Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Протопопов Е.В., Уполовникова А.Г., Сметанников А.Н. Фундаментальные исследования физико-химических свойств экологически чистых бесфтористых шлаков и их использование в ковшевой металлургии стали // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 6. С. 406–412. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-406-412>

Original article

## FUNDAMENTAL STUDIES OF PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF ENVIRONMENTALLY FRIENDLY FLUORINE-FREE SLAGS AND THEIR USE IN LADLE STEEL INDUSTRY

A. A. Babenko<sup>1</sup>, L. A. Smirnov<sup>1</sup>, E. V. Protopopov<sup>2</sup>,  
A. G. Upolovnikova<sup>1</sup>, A. N. Smetannikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

<sup>2</sup> Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

**Abstract.** The article describes theoretical and experimental studies of dependence of viscosity, coefficients of sulfur and boron distribution between slag and metal, and wear degree of periclase-carbon refractories on basicity and boron oxide content in slag. It is shown that formed slags have basicity of 2.0 – 5.0 and rather high liquid mobility. These slags are characterized by an equilibrium interfacial distribution coefficient of sulfur increased to 5 – 20, which provides equilibrium sulfur content in the metal reduced to 0.001 – 0.005 %. The results of fundamental studies of the physicochemical properties of refining slags of CaO–SiO<sub>2</sub>–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MgO system formed the basis for development of the composition of environmentally friendly fluorine-free ladle slags and technological methods for their formation in ladle-furnace unit. The recommended composition of such slags of low viscosity, which allows deep metal desulfurization, direct steel microalloying with boron and low aggressive effect on periclase-carbon refractories, provides formation of slags with a basicity of 3.0 – 4.0, containing 1 – 4 % B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 15 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and 8 % MgO. The formation of environmentally friendly ladle slags of the recommended composition was carried out in a ladle-furnace by loading lime, boron-containing material – colemanite (Turkey) containing 39 – 41 % B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 26 – 28 % CaO, not more than 5 % SiO<sub>2</sub> and 3 % MgO, and pyramidal aluminum into the steel-teeming ladle for slag deoxidation and boron recovery. Introduction of the developed technology for the formation of ladle slags of recommended composition ensured the production of economically alloyed low-carbon structural boron-containing steels with a low sulfur content, incl. for large diameter pipes with high strength properties.

**Keywords:** viscosity, boron oxide, slag stabilization, sulfur distribution, thermodynamic modeling, periclase-carbon refractories, yield strength, time resistance

**Funding:** The research was carried out within the framework of the state task of the Institute of Metallurgy of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences.

**For citation:** Babenko A.A., Smirnov L.A., Protopopov E.V., Upolovnikova A.G., Smetannikov A.N. Fundamental studies of physicochemical properties of environmentally friendly fluorine-free slags and their use in ladle steel industry. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 6, pp. 407–412. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-406-412>

## ВВЕДЕНИЕ

В ряду приоритетных направлений совершенствования металлургических технологий, направленных на выполнение требований к качеству и себестоимости металлопродукции, особое место занимает ковшевая металлургия. Одним из высокоэффективных технологических приемов внепечной обработки, обеспечивающим решение проблемы, является глубокая десульфурация металла [1 – 3]. Известно, что присутствие серы в металле снижает механическую прочность и свариваемость стали, ухудшает электротехнические, антикоррозионные и другие свойства. При этом значительное снижение содержания серы обеспечивается обработкой металла на установках типа ковш – печь (LF-Процесс) синтетическими рафинировочными шлаками. В качестве таких рафинировочных шлаков, как правило, используются высокоосновные шлаки системы CaO–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с добавками CaF<sub>2</sub> [1 – 6]. Эффективность использования фторида кальция связывают, прежде всего, с разжижающим воздействием на формируемые основные шлаки. Кратковременное действие плавикового шпата на шлаки осложняется снижением концентрации фторидов кальция в шлаке за счет их высокой летучести в условиях высоких температур [4, 5]. Этот процесс сопровождается ухудшением экологической обстановки и снижением эффективности использования сульфидной емкости формируемых фторсодержащих шлаков [6]. Экологическая вредность летучих фторидов, их агрессивность по отношению к оборудованию и огнеупорной футеровке сталеразливочных ковшей, нестабильность физико-химических свойств формируемых шлаков вызывают необходимость разработки оптимальных составов экологически чистых бесфтористых шлаков с низкой вязкостью и высокими рафинирующими свойствами.

В соответствии с современными данными [7 – 10] высокоосновные шлаки ковшевой металлургии всегда подвержены силикатному распаду. Продукты распада представляют собой преимущественно мелкозернистый тонкодисперсный пылевидный материал, который легко аэрируется и негативно влияет на окружающую среду, в том числе атмосферный воздух, почву, водоемы. Основными причинами такого распада являются полиморфные превращения двухкальциевого силиката 2CaO·SiO<sub>2</sub>, переход которого из β в γ-форму сопровождается увеличением удельного объема на 10 – 12 % [7]. Возможным решением данной экологической проблемы является исключение развития процессов силикатного распада шлаков путем использования оксида бора вместо плавикового шпата [8]. Применение технологии кристаллохимической стабилизации состава шлака в сталеплавильном процессе путем подачи в ковш добавок соединений бора позволит предотвратить распад рафинировочных шлаков и получить кусковой материал с преобладанием активной белитовой формы двухкальциевого силиката [7 – 10]. При этом применение оксидов бора предотвращает развитие процессов силикатного распада шлаков, снижает температуру их кристаллизации и вязкость, обеспечивая эффективную десульфурацию металла [11 – 17].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

С целью изучения физико-химических свойств экологически чистых бесфтористых рафинировочных шлаков ковшевой металлургии был выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований зависимости вязкости, коэффициентов распределения серы и бора между шлаком и металлом, степени износа периклазуоглеродистого огнеупора от основности и содержания оксида бора в шлаке.

Для исследования влияния основности и содержания  $V_2O_3$  в шлаке на вязкость и на межфазное распределение серы и бора между шлаком системы  $CaO-SiO_2-V_2O_3-15\% Al_2O_3-8\% MgO$  и металлом использовали симплекс-решетчатый метод планирования эксперимента, который позволяет получать математические модели, описывающие зависимость свойства от состава в виде непрерывной функции [17, 18]. В работе использован программный комплекс HSC 6.1 Chemistry (Outokumpu) для термодинамического моделирования равновесного межфазного распределения серы и бора между шлаком системы  $CaO-SiO_2-V_2O_3-15\% Al_2O_3-8\% MgO$  и металлом. Моделирование выполнено для температуры 1500 °С, рабочей массы тела 110 кг (100 кг металла и 10 кг шлака) при давлении воздуха окружающей среды в системе 0,1 МПа [19–21]. Измерение вязкости шлаков проводили на электровибрационном вискозиметре в графитовых тиглях [17, 22]. Температуру шлака фиксировали с помощью термопары ПР 30/6. Температуру кристаллизации шлаков исследуемой оксидной системы определяли графически по перегибу кривой зависимости логарифма вязкости от обратной температуры. Для исследования степени износа периклазоуглеродистого огнеупора тигель со шлаком и огнеупорным образцом нагревали в печи Таммана до температуры 1600 °С и выдерживали при этой температуре в течение 60 мин. После этого огнеупорный образец извлекали и измеряли его массу. Растворимость огнеупорного образца (выраженную в % (отн.)) определяли по изменению его массы за время выдержки в шлаке.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования вязкости изучаемой оксидной системы при температуре 1600 °С представлены в виде диаграммы состав – вязкость (рис. 1, а), анализ которой позволяет количественно оценить влияние основности и содержания  $V_2O_3$  на вязкость шлаков, содержащих 15 %  $Al_2O_3$  и 8 %  $MgO$ . Показано, что формируемые шлаки в диапазоне основности 2,0–5,0 характеризуются достаточно высокой жидкоподвижностью. Вязкость шлаков изменяется в пределах 0,1–0,3 Па·с.

Результаты термодинамического моделирования влияния основности шлака и содержания  $V_2O_3$  на равновесный коэффициент распределения серы между шлаком изучаемой оксидной системы и низкоуглеродистым металлом приведены на рис. 1, б. Как видно, борсодержащие шлаки основностью 2,0–3,0, содержащие 4–6 %  $V_2O_3$ , характеризуются относительно низкими рафинирующими свойствами: равновесный межфазный коэффициент распределения серы изменяется от 0,5 до 2,0, обеспечивая равновесное содержание серы в металле на уровне 0,01–0,02 %. И только в случае, когда оксидная система смещается в область повышенной до 3,0 основности, равновесный межфаз-

ный коэффициент распределения серы увеличивается до 5,0 при пониженной до 1–4 % концентрации  $V_2O_3$ , обеспечивая при этом равновесное содержание серы в металле на уровне 0,005–0,008 %. Формирование шлаков при основности 3,0–4,0 обеспечивает в диапазоне 1–4 %  $V_2O_3$  достаточно высокие его рафинирующие свойства. Эти шлаки характеризуются повышенным до 5–20 равновесным межфазным коэффициентом распределения серы, который обеспечивает пониженное до 0,001–0,005 % равновесное содержание серы в металле. При формировании шлаков основностью более 4 не наблюдается существенного повышения рафинирующих свойств в рассматриваемом (1–4 %) диапазоне концентрации  $V_2O_3$ , в то же время рост основности формируемых шлаков будет сопровождаться повышением себестоимости стали за счет увеличения расхода извести.

Результаты термодинамического моделирования влияния основности шлака и содержания  $V_2O_3$  на равновесное распределение бора между шлаком изучаемой оксидной системы в низкоуглеродистом металле приведены на рис. 1, в. Равновесный коэффициент распределения бора между шлаком основности 2,0–3,0, содержащим 4–6 %  $V_2O_3$ , и металлом изменяется в пределах 350–450 при температуре 1600 °С. Смещение шлаков в область повышенной до 3,0–4,0 основности сопровождается при содержании 1–4 %  $V_2O_3$  снижением равновесного межфазного коэффициента распределения бора до 200–250, и, как следствие, повышением эффективности протекания процесса восстановления бора.

На рис. 2 приведена диаграмма состав – свойство, характеризующая влияние химического состава шлака изучаемой оксидной системы  $CaO-SiO_2-V_2O_3-15\% Al_2O_3$  на степень износа периклазоуглеродистого огнеупора без оксида магния. Основным компонентом периклазоуглеродистого огнеупора является оксид магния и для максимально возможного перехода его из огнеупора в шлак берется шлак, не содержащий оксид магния. Шлаки основностью 3,0–4,0, содержащие 1–4 %  $V_2O_3$ , характеризуются степенью износа периклазоуглеродистых огнеупоров ковша, не превышающей примерно 20 %. Увеличение содержания  $V_2O_3$  в пределах 4–6 % в рассматриваемом диапазоне основности сопровождается повышением степени износа периклазоуглеродистого огнеупора вплоть до 30 %. Установлено, что для снижения агрессивного воздействия шлаков рассматриваемого состава целесообразно их формирование в области насыщения  $MgO$ .

Результаты фундаментальных исследований физико-химических свойств шлаков системы  $CaO-SiO_2-V_2O_3$ , содержащих порядка 8 %  $MgO$  и 15 %  $Al_2O_3$ , легли в основу разработки оптимальных составов экологически чистых бесфтористых ковшевых шлаков основностью 3,0–4,0, содержащих 1–4 %  $V_2O_3$ , 15 %  $Al_2O_3$  и 8 %  $MgO$ , и технологических приемов их формиро-

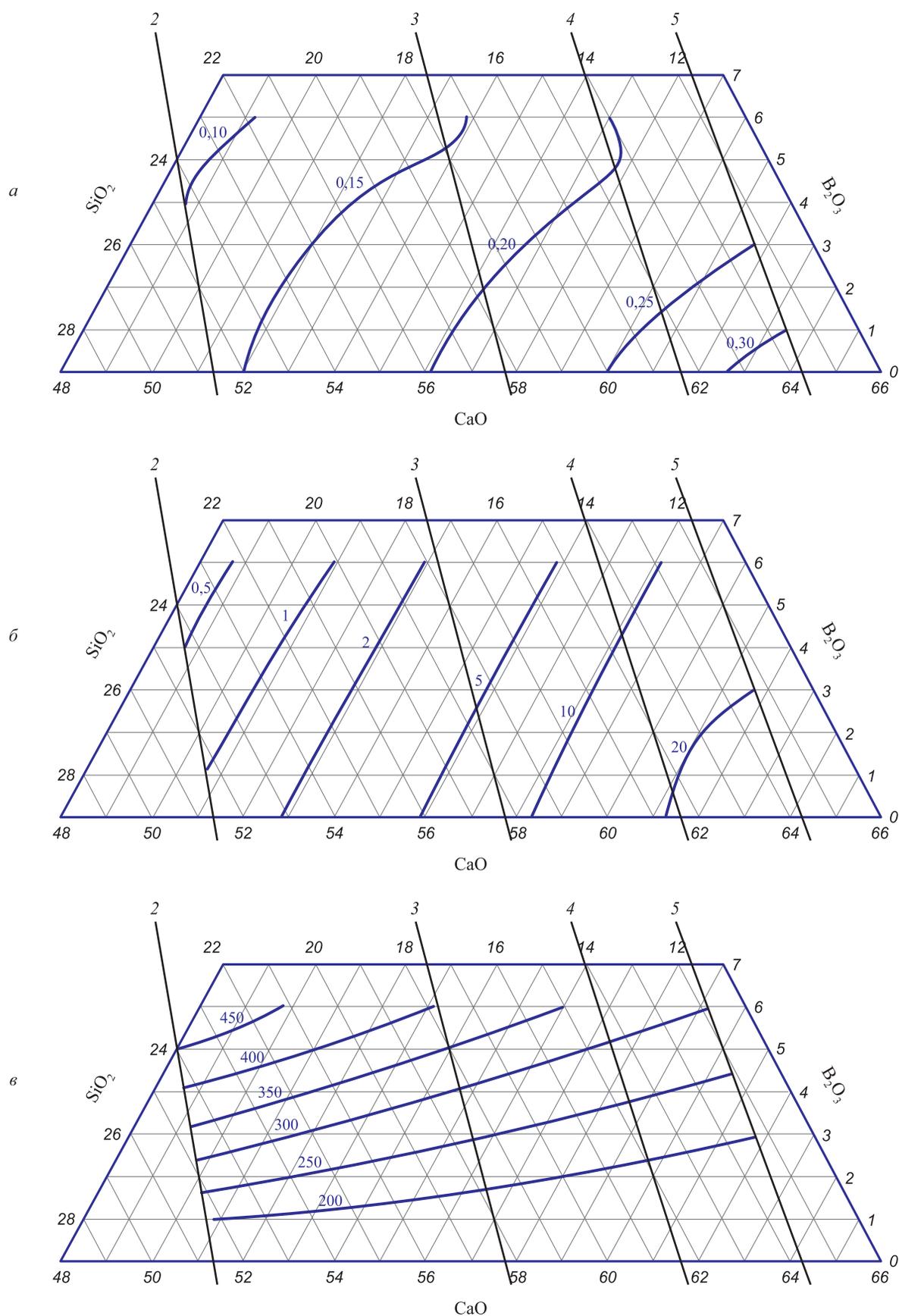


Рис. 1. Диаграмма состав – вязкость (а), диаграмма равновесного распределения серы (б) и бора (е) между шлаком и металлом для шлаков системы CaO–SiO<sub>2</sub>–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, содержащей 8 % MgO и 15 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, при температуре 1600 °С (сплошные черные линии – основность)

Fig. 1. Diagram of composition – viscosity (a), diagram of equilibrium distribution of sulfur (b) and boron (e) between slag and metal for slags of CaO–SiO<sub>2</sub>–B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system containing 8 % MgO and 15 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at a temperature of 1600 °C (solid black lines – basicity)

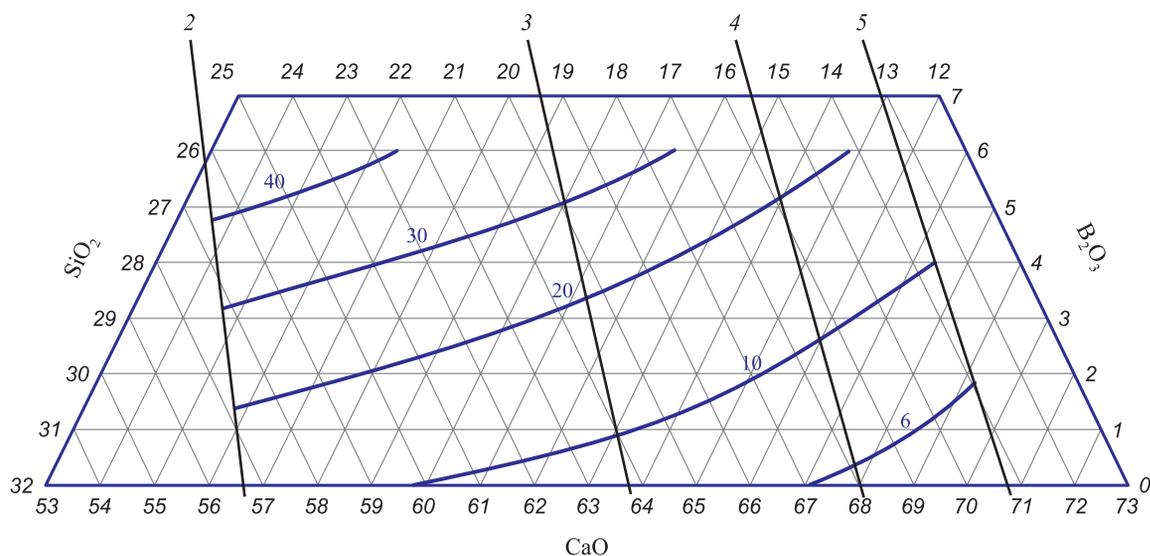


Рис. 2. Диаграмма состав – растворимость периклазоуглеродистого огнеупора в шлаках системы  $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ , содержащих 15 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , при температуре 1600 °С (сплошные линии – основность шлаков)

Fig. 2. Diagram of composition – solubility of periclase-carbon refractory in slags of  $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$  system containing 15 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  at a temperature of 1600 °C (solid lines – basicity of slags)

вания при внепечной обработке стали на установке ковш – печь. Внедрение разработанной, не имеющей аналогов в отечественной и зарубежной практике технологии формирования и использования ковшевых шлаков рекомендованного состава в конвертерном цехе АО «АрселорМиттал Темиртау» (Республика Казахстан) обеспечило производство экономнолегированной марганцем низкоуглеродистой стали, содержащей 0,001 – 0,006 % бора и 0,004 – 0,014 % серы, сокращение расхода марганцевых ферросплавов на 0,3 – 0,8 кг/т стали, возможность исключения присадок плавикового шпата и достижения высоких механических свойств готового металлопроката [21]. Так, в текущем производстве проката толщиной 0,25 – 0,50 мм стали 08кп, содержащей в среднем 0,001 % бора, отмечено увеличение предела текучести и временного сопротивления в среднем на 73,4 и 30,5 МПа соответственно. Относительное удлинение, характеризующее пластические свойства проката, достигает в металле в среднем 33,6 против 32,7 % на сравнительных плавках. Положительное влияние бора на прочностные свойства зафиксировано при производстве стали 3пс, 3сп и 09Г2С. При производстве трубной стали 17Г1С-У выделенные неметаллические включения, представленные преимущественно мелкими (не более 5 мкм) оксидными и окисульфидными включениями с исходной составляющей на основе алюмомагниевого шпинели с небольшим содержанием сульфидных включений на поверхности, и формирование мелкодисперсной структуры ферритно-бейнитного типа обеспечили высокие прочностные

свойства горячекатаного проката толщиной 10 мм, соответствующие классу прочности Х80 без термической обработки.

## Выводы

Формируемые шлаки в диапазоне основности 2,0 – 5,0 характеризуются достаточно высокой жидкоподвижностью. Эти шлаки характеризуются повышенным до 5 – 20 равновесным межфазным коэффициентом распределения серы, который обеспечивает пониженное до 0,001 – 0,005 % равновесное содержание серы в металле. Результаты фундаментальных исследований физико-химических свойств рафинировочных шлаков системы  $\text{CaO-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  легли в основу разработки состава экологически чистых бесфтористых ковшевых шлаков и технологических приемов их формирования на установке ковш – печь. Рекомендованный состав экологически чистых ковшевых шлаков низкой вязкости, обеспечивающих глубокую десульфурацию металла, прямое микролегирование стали бором и низкое агрессивное воздействие на периклазоуглеродистые огнеупоры, предусматривает формирование шлаков основностью 3,0 – 4,0, содержащих 1 – 4 %  $\text{B}_2\text{O}_3$ , 15 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 8 %  $\text{MgO}$ . Технология формирования таких шлаков на установках ковш – печь обеспечило производство экономнолегированной марганцем низкоуглеродистой стали, содержащей 0,001 – 0,006 % бора и 0,004 – 0,014 % серы, сокращение расхода марганцевых ферросплавов от 0,3 до 0,8 кг/т стали.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. В 3 т. Т. 3. Внепечная металлургия стали. М.: Теплотехник, 2010. 544 с.
2. Чумаков С.М., Ламухин А.М., Зинченко С.Д. и др. Концепция производства низкосернистых сталей на ОАО «Северсталь» с учетом технологических аспектов. В кн.: Труды VI конгресса сталеплавильщиков. М.: АО «Черметинформация», 2001. С. 63–66.
3. Takahashi D., Kamo M., Kurose Y., Nomura H. Deep steel desulphurisation technology in ladle furnace at KSC // *Ironmaking and Steelmaking*. 2003. Vol. 30. No. 2. P. 116–119. <https://doi.org/10.1179/030192303225001711>
4. Физические свойства расплавов системы  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{CaF}_2$  / А.А. Акбердин, И.С. Куликов, В.А. Ким, А.К. Надьбеков, А.С. Ким. М.: Металлургия, 1987. 144 с.
5. Wang H.-M., Li G.-R., Dai Q.-X., Li B., Zhang X.-J., Shi G.M. CAS-OB refining: slag modification with  $\text{B}_2\text{O}_3-\text{CaO}$  and  $\text{CaF}_2-\text{CaO}$  // *Ironmaking and Steelmaking*. 2007. Vol. 34. No. 4. P. 350–353. <https://doi.org/10.1179/174328107X155277>
6. Ko K.Y., Park J.H. Effect of  $\text{CaF}_2$  addition on the viscosity and structure of  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{MnO}$  slags // *ISIJ International*. 2013. Vol. 53. No. 6. P. 958–965. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.958>
7. Демин Л.Б., Сорокин Ю.В., Смирнов Л.А., Щербakov Е.Н. Стабилизация распадающихся ферросплавных и сталеплавильных шлаков. В кн.: Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: тр. международной науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2018. С. 342–345.
8. Babenko A.A., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G., Smetannikov A.N. Разработка состава экологически чистых бесфтористых шлаков ковшевой металлургии стали. В кн.: Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: сб. трудов V международного Конгресса ТЕХНОГЕН-2021. Екатеринбург, 2021. С. 349–350.
9. Grabeklis A.A., Demin B.L., Kairakbaev S.N., Musabekov Zh.B., Kavanov B.O. Новое в технологии кристаллохимической стабилизации шлаков производства рафинированного феррохрома // *Сталь*. 2010. № 5. С. 78–83.
10. Демин Б.Л., Сорокин Ю.В., Шарафутдинов Р.Я., Мурзин А.В., Жилин А.М. Опробование технологии кристаллохимической стабилизации самораспадающихся сталеплавильных шлаков // *Сталь*. 2014. № 6. С. 102–106.
11. Акбердин А.А., Киреева Г.М., Медведовская И.А. Влияние  $\text{B}_2\text{O}_3$  на вязкость шлаков  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$  // *Известия АН СССР. Металлы*. 1986. № 3. С. 55–56.
12. Hongming W., Tingwang Z., Hua Z. Effect of  $\text{B}_2\text{O}_3$  on melting temperature, viscosity and desulfurization capacity of  $\text{CaO}$ -based refining flux // *ISIJ International*. 2011. Vol. 51. No. 5. P. 702–708. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.702>
13. Zhang L., Wang W., Xie S., Zhang K., Sohn I. Effect of basicity and  $\text{B}_2\text{O}_3$  on the viscosity and structure of fluorine-free mold flux // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2017. Vol. 460. P. 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.01.031>
14. Benavidez E., Santini L., Valentini M., Brandaleze E. Influence of different oxides on the viscosity of fluorine-free mold fluxes // *Procedia Materials Science*. 2012. Vol. 1. P. 389–396. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2012.06.052>
15. Li W., Xue X. Effects of  $\text{Na}_2\text{O}$  and  $\text{B}_2\text{O}_3$  addition on viscosity and electrical conductivity of  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{SiO}_2$  // *ISIJ System International*. 2018. Vol. 58. No. 10. P. 1751–1760. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-212>
16. Liu L.X., Wang G., Wang Sh.J., Dong Y.C., Chai Y.F. Calculation of phase diagram of  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{B}_2\text{O}_3$  refining slag without  $\text{CaF}_2$  // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 512–515. P. 1558–1563. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.512-515.1558>
17. Babenko A.A., Shartdinov R.R., Upolovnikova A.G., Smetannikov A.N., Mikhailova L.Yu. Effect of basicity and chromium
1. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V. *Steel Production*. In 3 vols. Vol. 3. *Extra-Furnace Metallurgy of Steel*. Moscow: Teplotekhnik, 2010, 544 p. (In Russ.).
2. Chumakov S.M., Lamukhin A.M., Zinchenko S.D., etc. Concept of production of low-sulfur steels at JSC Severstal taking into account technological aspects. In: *Proceedings of the VI Congress of Steelmakers*. Moscow: AO "Chermetinformatsiya", 2001, pp. 63–66. (In Russ.).
3. Takahashi D., Kamo M., Kurose Y., Nomura H. Deep steel desulphurisation technology in ladle furnace at KSC. *Ironmaking and Steelmaking*. 2003, vol. 30, no. 2, pp. 116–119. <https://doi.org/10.1179/030192303225001711>
4. Akberdin A.A., Kulikov I.S., Kim V.A., Nadyrbekov A.K., Kim A.S. *Physical Properties of the Melts of  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{CaF}_2$  System*. Moscow: Metallurgiya, 1987, 144 p. (In Russ.).
5. Wang H.-M., Li G.-R., Dai Q.-X., Li B., Zhang X.-J., Shi G.M. CAS-OB refining: slag modification with  $\text{B}_2\text{O}_3-\text{CaO}$  and  $\text{CaF}_2-\text{CaO}$ . *Ironmaking and Steelmaking*. 2007, vol. 34, no. 4, pp. 350–353. <https://doi.org/10.1179/174328107X155277>
6. Ko K.Y., Park J.H. Effect of  $\text{CaF}_2$  addition on the viscosity and structure of  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{MnO}$  slags. *ISIJ International*. 2013, vol. 53, no. 6, pp. 958–965. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.958>
7. Demin L.B., Sorokin Yu.V., Smirnov L.A., Shcherbakov E.N. Stabilization of decaying ferroalloy and steelmaking slags. In: *Prospects for the Development of Metallurgy and Mechanical Engineering using Completed Fundamental Research and R&D: Proceedings of the Int. Sci. and Pract. Conf.* Yekaterinburg, 2018, pp. 342–345. (In Russ.).
8. Babenko A.A., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G., Smetannikov A.N. Development of composition of environmentally friendly fluorine-free slags of ladle steel metallurgy. In: *Fundamental Research and Applied Development of Processing and Utilization of Technogenic Formations: Proceedings of the V Int. Congress TECHNOGEN-2021*. Yekaterinburg, 2021, pp. 349–350. (In Russ.).
9. Grabeklis A.A., Demin B.L., Kairakbaev S.N., Musabekov Zh.B., Kavanov B.O. New in technology of crystal-chemical stabilization of slags from refined ferrochrome production. *Stal'*. 2010, no. 5, pp. 78–83. (In Russ.).
10. Demin B.L., Sorokin Yu.V., Sharafutdinov R.Ya., Murzin A.V., Zhilin A.M. Testing the technology of crystal chemical stabilization of self-decaying steelmaking slags. *Stal'*. 2014, no. 6, pp. 102–106. (In Russ.).
11. Akberdin A.A., Kireeva G.M., Medvedovskaya I.A. Effect of  $\text{B}_2\text{O}_3$  on the viscosity of slags  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ . *Izvestiya AN SSSR. Metally*. 1986, no. 3, pp. 55–56. (In Russ.).
12. Hongming W., Tingwang Z., Hua Z. Effect of  $\text{B}_2\text{O}_3$  on melting temperature, viscosity and desulfurization capacity of  $\text{CaO}$ -based refining flux. *ISIJ International*. 2011, vol. 51, no. 5, pp. 702–708. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.702>
13. Zhang L., Wang W., Xie S., Zhang K., Sohn I. Effect of basicity and  $\text{B}_2\text{O}_3$  on the viscosity and structure of fluorine-free mold flux. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2017, vol. 460, pp. 113–118. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.01.031>
14. Benavidez E., Santini L., Valentini M., Brandaleze E. Influence of different oxides on the viscosity of fluorine-free mold fluxes. *Procedia Materials Science*. 2012, vol. 1, pp. 389–396. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2012.06.052>
15. Li W., Xue X. Effects of  $\text{Na}_2\text{O}$  and  $\text{B}_2\text{O}_3$  addition on viscosity and electrical conductivity of  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{SiO}_2$ . *ISIJ System International*. 2018, vol. 58, no. 10, pp. 1751–1760. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-212>
16. Liu L.X., Wang G., Wang Sh.J., Dong Y.C., Chai Y.F. Calculation of phase diagram of  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{B}_2\text{O}_3$  refining slag without  $\text{CaF}_2$ . *Advanced Materials Research*. 2012, vol. 512–515, pp. 1558–1563. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.512-515.1558>
17. Babenko A.A., Shartdinov R.R., Upolovnikova A.G., Smetannikov A.N., Mikhailova L.Yu. Effect of basicity and chromium

- oxide on the viscosity of boron-containing slags // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 966. Article 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012012>
18. Планирование эксперимента при исследовании физико-химических свойств металлургических шлаков / В.А. Ким, Э.Н. Николай, А.А. Акбердин, И.С. Куликов. Алма-Ата: Наука, 1989. 116 с.
  19. Babenko A.A., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G. Boron distribution between Fe – C – Si – Al melt and boron-bearing slag // Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods & Technologies. 2018. No. 12. P. 202–208.
  20. Babenko A.A., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G. Theoretical and experimental studies of sulfur and boron distribution between the slag of the CaO – SiO<sub>2</sub> – B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – MgO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system and the metal // Defect and Diffusion Forum. 2021. Vol. 410. P. 287–292. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.410.287>
  21. Babenko A.A., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G. Fundamental research as a basis for the creation of new technologies in steel ladle metallurgy // Materials Science Forum. 2019. Vol. 946. P. 493–499. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.493>
  22. Физико-химические методы исследования металлургических процессов: учебник для вузов / П.П. Арсентьев, В.В. Яковлев, М.Г. Крашенинников и др. М.: Металлургия, 1988. 511 с.
  - oxide on the viscosity of boron-containing slags. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 966, article 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/966/1/012012>
  18. Kim V.A., Nikolai E.N., Akberdin A.A., Kulikov I.S. *Planning an Experiment in Research of Physico-Chemical Properties of Metallurgical Slags*. Alma-Ata: Nauka, 1989, 116 p. (In Russ.).
  19. Babenko A.A., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G. Boron distribution between Fe – C – Si – Al melt and boron-bearing slag. *Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods & Technologies*. 2018, no. 12, pp. 202–208.
  20. Babenko A.A., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G. Theoretical and experimental studies of sulfur and boron distribution between the slag of the CaO – SiO<sub>2</sub> – B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – MgO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> system and the metal. *Defect and Diffusion Forum*. 2021, vol. 410, pp. 287–292. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.410.287>
  21. Babenko A.A., Smirnov L.A., Upolovnikova A.G. Fundamental research as a basis for the creation of new technologies in steel ladle metallurgy. *Materials Science Forum*. 2019, vol. 946, pp. 493–499. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.493>
  22. Arsent'ev P.P., Yakovlev V.V., Krasheninnikov M.G., etc. *Physico-Chemical Methods of Metallurgical Processes Research: Textbook for Universities*. Moscow: Metallurgiya, 1988, 511 p. (In Russ.).

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Анатолий Алексеевич Бабенко**, д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник, Институт металлургии УрО РАН  
**ORCID:** 0000-0003-0734-6162  
**E-mail:** babenko251@gmail.com

**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 Sciences  
**ORCID:** 0000-0003-0734-6162  
**E-mail:** babenko251@gmail.com

**Леонид Андреевич Смирнов**, академик РАН, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт металлургии УрО РАН  
**ORCID:** 0000-0002-6324-4032  
**E-mail:** uim@ural.ru

**Leonid A. Smirnov**, Academician, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences  
**ORCID:** 0000-0002-6324-4032  
**E-mail:** uim@ural.ru

**Евгений Валентинович Протопопов**, д.т.н., профессор, профессор кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0002-7554-2168  
**E-mail:** protopopov@sibsiu.ru

**Evgenii V. Protopopov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0002-7554-2168  
**E-mail:** protopopov@sibsiu.ru

**Алена Геннадьевна Уполовникова**, к.т.н., старший научный сотрудник, Институт металлургии УрО РАН  
**ORCID:** 0000-0002-6698-5565  
**E-mail:** upol.ru@mail.ru

**Alena G. Upolovnikova**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences  
**ORCID:** 0000-0002-6698-5565  
**E-mail:** upol.ru@mail.ru

**Артем Николаевич Сметанников**, младший научный сотрудник лаборатории стали и ферросплавов, Институт металлургии УрО РАН  
**ORCID:** 0000-0001-9206-0905  
**E-mail:** artem.smetannikov.89@mail.ru

**Artem N. Smetannikov**, Junior Researcher of Laboratory of Steel and Ferroalloys, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences  
**ORCID:** 0000-0001-9206-0905  
**E-mail:** artem.smetannikov.89@mail.ru

#### ВКЛАД АВТОРОВ

#### CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**А. А. Бабенко** – анализ, корректировка статьи.  
**Л. А. Смирнов** – анализ, корректировка статьи.  
**Е. В. Протопопов** – анализ, корректировка статьи.  
**А. Г. Уполовникова** – термодинамический расчет, написание статьи.  
**А. Н. Сметанников** – построение диаграмм, написание и оформление статьи.

**A. A. Babenko** – analysis, correction of the article.  
**L. A. Smirnov** – analysis, correction of the article.  
**E. V. Protopopov** – analysis, correction of the article.  
**A. G. Upolovnikova** – thermodynamic calculations, writing the article.  
**A. N. Smetannikov** – construction of diagrams, writing and design of the article.

Поступила в редакцию 21.02.2022  
 После доработки 11.03.2022  
 Принята к публикации 16.03.2022

Received 21.02.2022  
 Revised 11.03.2022  
 Accepted 16.03.2022



Оригинальная статья

УДК 669.162.263

DOI 10.17073/0368-0797-2022-6-413-420

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2322>

## АНАЛИЗ ШЛАКОВОГО РЕЖИМА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

А. В. Павлов<sup>1</sup>, Н. А. Спирин<sup>2</sup>, В. А. Бегинюк<sup>1</sup>,  
В. В. Лавров<sup>2</sup>, И. А. Гурин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (Россия, 455000, Челябинская обл., Магнитогорск, ул. Кирова, 93)

<sup>2</sup> Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 28)

**Аннотация.** Представлена усовершенствованная сотрудниками УрФУ – ММК («Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» – ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат») балансовая модель доменного процесса. Модель в общем виде представляет собой систему детерминированных зависимостей, характеризующих тепловой, восстановительный, газодинамический, дутьевой и шлаковый режимы доменной плавки. В основу модели положен принцип натурно-математического моделирования. Предложены показатели, характеризующие свойства конечного шлака для реализации нормального шлакового режима доменной плавки (вязкость шлака в температурном интервале 1350 – 1550 °С, градиенты вязкости шлака). Градиент вязкости наряду с допустимыми при различных температурах шлака диапазонами вязкости шлака используются при моделировании шлакового режима в качестве ограничивающих факторов для диагностики шлакового режима. Выбор предельных значений каждого из диапазонов и градиента вязкости осуществляется методом экспертного оценивания. Представлена структура модели расчета параметров конечного шлака. С использованием математической модели доменного процесса выполнен анализ шлакового режима доменной плавки по фактическим показателям их работы. Установлено, что обессеривающая способность шлака используется недостаточно полно, в результате выплавляется чугун пониженного качества как по содержанию серы, так и по содержанию кремния. Изменение характеристик шлакового режима при прочих равных условиях положительно сказывается на газопроницаемости в зоне шлакообразования, повышается восстановительная способность газа и производительность доменной печи, снижается расход кокса. Представлены результаты проектных расчетов показателей работы печей ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» при изменении состава загружаемых материалов. Даны рекомендации по оптимальной основности шлака. Как показали расчеты, оптимальная основность конечного шлака, обеспечивающая максимальную его жидкоподвижность, для условий работы доменных печей комбината составляет 1,04 – 1,05 для соотношения CaO/SiO<sub>2</sub> и 1,30 – 1,32 для соотношения (CaO + MgO)/SiO<sub>2</sub>.

**Ключевые слова:** доменный процесс, шлаковый режим, математическое моделирование, анализ

**Для цитирования:** Павлов А.В., Спирин Н.А., Бегинюк В.А., Лавров В.В., Гурин И.А. Анализ шлакового режима доменной плавки с использованием модельных систем поддержки принятия решений // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 6. С. 413–420.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-413-420>

Original article

## ANALYSIS OF SLAG MODE OF BLAST FURNACE MELTING USING MODEL DECISION SUPPORT SYSTEMS

A. V. Pavlov<sup>1</sup>, N. A. Spirin<sup>2</sup>, V. A. Beginyuk<sup>1</sup>,  
V. V. Lavrov<sup>2</sup>, I. A. Gurin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> PJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works” (93 Kirova Str., Magnitogorsk, Chelyabinsk Region 455000, Russian Federation)

<sup>2</sup> Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (28 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

**Abstract.** The article presents a balance model of the blast furnace process improved by the researchers from UrFU and PJSC “Magnitogorsk Iron and Steel Works” (MMK). It generally represents a system of deterministic dependencies characterizing the thermal, reduction, gas dynamic, blast and slag modes of blast furnace melting. The basic principle underlying the model is full-scale mathematical modeling. Indicators characterizing the properties

of the final slag for implementation of normal slag mode of blast furnace melting (slag viscosity in the temperature range of 1350 – 1550 °C, as well as values of the slag viscosity gradients) were proposed. The slag viscosity gradient, along with the acceptable ranges of slag viscosity at different slag temperatures, are used in modeling the slag mode as limiting factors for the diagnosis of slag mode. Selection of the limit values of each of the ranges and the viscosity gradient is carried out by the method of expert evaluation. Structure of the model for calculating the parameters of the final slag is considered. Using a mathematical model of the blast furnace process, analysis of the slag mode of blast furnace melting was performed according to the actual indicators of their operation. It was established that desulfurizing ability of the slag is insufficiently used, as a result of which cast iron of reduced quality is smelted both in terms of content of sulfur and silicon. Change in characteristics of the slag mode, other things being equal, has a positive effect on gas permeability in the slag formation zone, reducing capacity of the gas and productivity of the blast furnace increase, as well as the consumption of coke decreases. The authors describe the results of design calculations of the MMK furnace performance indicators when changing the composition of loaded materials. Recommendations on the slag optimal basicity are given. Calculations showed that the optimal basicity of the final slag, which ensures its maximum liquid mobility, for operating conditions of blast furnaces of the combine is 1.04 – 1.05 for the CaO/SiO<sub>2</sub> ratio and 1.30 – 1.32 for the (CaO + MgO)/SiO<sub>2</sub> ratio.

**Keywords:** blast-furnace process, slag mode, mathematical modeling, analysis

**For citation:** Pavlov A.V., Spirin N.A., Beginyuk V.A., Lavrov V.V., Gurin I.A. Analysis of slag mode of blast furnace melting using model decision support systems. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 6, pp. 413–420. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-413-420>

## ВВЕДЕНИЕ

Высокая конкуренция на мировом рынке чугуна и стали, повышение стоимости сырья и топлива, внутреннее ужесточение экологических требований диктуют необходимость непрерывного анализа и совершенствования технологии доменной плавки. В ситуации, когда анализ технологии с помощью проведения опытных плавков имеет труднопредсказуемые последствия и требует огромных материальных и финансовых затрат, использование модельных систем поддержки принятия решений для анализа доменной плавки и разработки рекомендаций по ее совершенствованию является единственным рациональным и научно обоснованным решением [1 – 7].

## МОДЕЛЬ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА

Разработанная сотрудниками УрФУ – ММК («Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» – ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат») балансовая модель доменного процесса в общем виде представляет собой систему детерминированных зависимостей, характеризующих тепловой, восстановительный, газодинамический, дутьевой и шлаковый режимы доменной плавки. Основные расчетные соотношения и примеры реализации этой модели подробно описаны в работах [2 – 4]. В основе модели лежит натурно-модельный подход и натурно-математическое моделирование. В соответствии с этим подходом модель условно разделяется на две части: модель базового состояния и прогнозирующую модель. Модель базового состояния оценивает ход доменного процесса по имеющимся усредненным показателям за прошедший (базовый) период работы доменной печи. При этом используется информация о значениях как входных (характеристики дутья, состав и свойства загружаемой шихты и другие), так и выходных (состав жидких продуктов плавки, характеристики колошникового газа и другие) параметров. На основе результатов, которые получены с помощью этой модели, прогнози-

рующая модель дает возможность оценивать показатели доменного процесса при изменении состава и свойств загружаемых в печь агломерата, окатышей, кокса, флюсующих добавок и характеристик дутья.

Моделирование свойств конечного шлака включает следующие расчетные блоки [2 – 4, 8]:

- определение выхода, состава и вида политермы вязкости конечного шлака;
- расчет десульфурирующей способности шлака и содержания серы в чугуне;
- диагностика шлакового режима.

Структура модели расчета параметров конечного шлака приведена на рис. 1. При расчете политерм вязкости конечного шлака использована трехкомпонентная шлаковая система CaO–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Учтено влияние на вязкость шлака оксидов MgO и TiO<sub>2</sub> [9 – 16].

Балансовая модель доменного процесса позволяет определять важнейшие свойства конечного шлака для реализации нормального шлакового режима плавки. Рассчитываются вязкости шлака в температурном интервале 1350 – 1550 °C, а также значения градиентов вязкости шлака:

- градиент 1 вязкости шлака показывает скорость изменения вязкости шлака в диапазоне от 0,7 до 2,5 Па·с при изменении температуры на 1 °C:

$$\Delta\eta_{0,7}^{2,5} = \frac{2,5 - 0,7}{t_{\text{шл}}^{0,7} - t_{\text{шл}}^{2,5}}, \quad (1)$$

- градиент 2 вязкости шлака показывает скорость изменения вязкости шлака при изменении температуры шлака на 1 °C в диапазоне от 1400 до 1500 °C:

$$\Delta\eta_{1400}^{1500} = \frac{\eta_{1400} - \eta_{1500}}{1500 - 1400}, \quad (2)$$

где  $\Delta\eta$  – градиент вязкости шлака, Па·с/°C;  $t_{\text{шл}}^{0,7}$  и  $t_{\text{шл}}^{2,5}$  – температура шлака, °C, при которой вязкость шлака составляет 0,7 и 2,5 Па·с.

Градиент вязкости 1 показывает, как быстро шлак теряет свою подвижность в области низких температур.

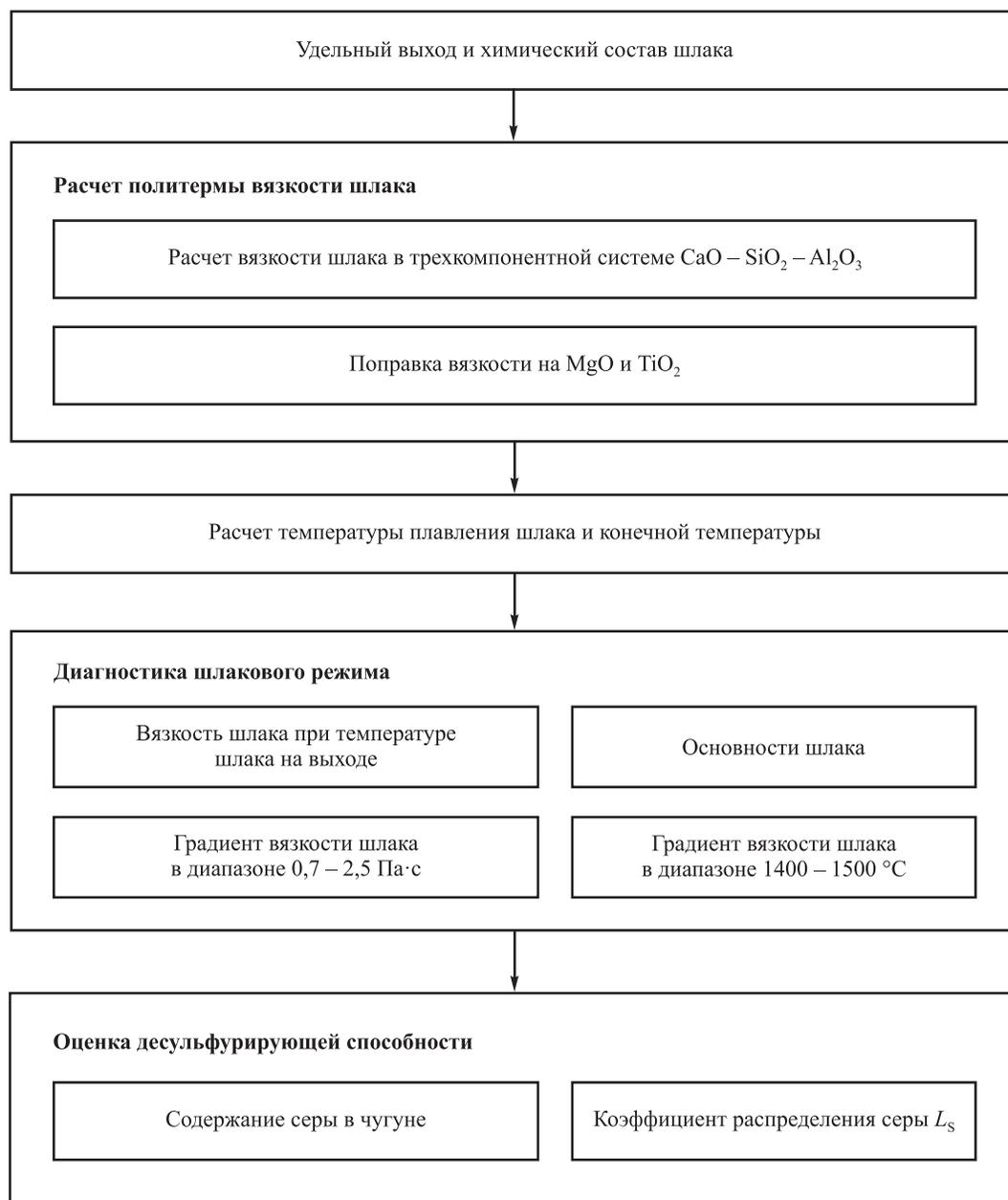


Рис. 1. Структура модели расчета параметров конечного шлака

Fig. 1. Structure of the model for calculating parameters of the final slag

По значению этого градиента вязкости можно судить, является шлак «коротким» или «длинным». По градиенту вязкости 2 определяют устойчивость шлака в области рабочих температур горна доменной печи.

Градиенты вязкости 1 и 2 совместно со значениями вязкости шлака при различных температурах используются при моделировании шлакового режима доменной печи для диагностики шлакового режима. Подбор минимальных и максимальных значений каждого параметра осуществляется методом экспертного оценивания. В табл. 1 обобщены данные о характеристике шлаков для условий доменных печей ММК при различных значениях вязкости и градиентов вязкости.

### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исходные данные для базового периода работы и расчетные для проектного периода 1 приведены в табл. 2. Расчет показателей доменной плавки для проектного периода 1 выполнен при том же составе и расходах железорудного сырья и кокса, при тех же текущих простоях и характеристиках дутья, но без учета расхода флюсов (из шихты выведено 6,5 кг/т чугуна кварцита). Расчетная производительность печи за счет снижения выхода шлака и содержания кремния в чугуне выросла на 237 т/сутки, а удельный расход кокса снизился на 3,7 кг/т чугуна в результате влияния тех же факторов.

Таблица 1

**Характеристика конечных шлаков при различных значениях вязкости и градиентов вязкости**

Table 1. Characterization of the final slags at different values of viscosity and viscosity gradients

Вязкость шлака	Характеристика шлака
$\eta_{1450} < 0,2 \text{ Па}\cdot\text{с}$	Шлак характеризуется малой вязкостью, обладает высокой агрессивностью к огнеупорной кладке и разрушает гарнисаж
$0,20 \leq \eta_{1450} \leq 0,55 \text{ Па}\cdot\text{с}$	Нормальная вязкость шлака, обладает хорошей обессеривающей способностью
$0,55 < \eta_{1450} < 0,65 \text{ Па}\cdot\text{с}$	Повышенная вязкость в диапазоне температур 1400 – 1500 °С
$\eta_{1450} \geq 0,65 \text{ Па}\cdot\text{с}$	Вязкость шлака в области рабочих температур превышает допустимые пределы для нормального режима плавки
$\Delta\eta_{0,7}^{2,5} > 0,035 \text{ Па}\cdot\text{с}/^\circ\text{C}$	Шлак относится к типу «коротких»; возможно загромождение горна печи и режим нормальной ее работы затруднен
$\Delta\eta_{1400}^{1500} > 0,0085 \text{ Па}\cdot\text{с}/^\circ\text{C}$	Шлак неустойчив в области рабочих температур 1400 – 1500 °С; возможно застывание шлака в желобах

Таблица 2

**Параметры доменной плавки в рассматриваемые периоды**

Table 2. Parameters of blast-furnace melting in the considered periods

Технологический показатель	Рассматриваемый период	
	Базовый	Проектный I
Производство среднесуточное, т/сутки	28 126	28 363
Удельный расход кокса, кг/т чугуна	428,6	424,9
Текущие простои, %	1,009	1,009
Удельный выход шлака (фактический), кг/т чугуна	329,6	н/д
Выход шлака, рассчитанный по балансу шлакообразующих, кг/т чугуна	318,5	312,7
Вынос пыли (уловленной), кг/т чугуна	18,4	18,4
Давление дутья, атм/МПа	2,54/0,359	2,54/0,359
Температура дутья, °С	1135,6	1135,6
Влажность дутья, г/м <sup>3</sup>	3,15	3,15
Содержание кислорода в дутье, %	26,64	26,64
Удельный расход природного газа, м <sup>3</sup> /т чугуна	100,5	100,5
Химический состав чугуна, %:		
Si	0,753	0,700
S	0,021	0,016
Mn	0,305	0,305
C	4,65	4,65
P	0,06	0,06
Ti	0,071	0,071
Химический состав шлака, %:		
CaO	37,66	38,39
SiO <sub>2</sub>	37,85	36,80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,40	11,57
MgO	8,55	8,75

Так как в реальных условиях работы имеют место колебания основности железорудного сырья, то это вызывает и колебания основности шлака, поэтому также выполнен расчет шлакового режима для тех же самых условий, но при увеличении основности агломерата  $\frac{CaO}{SiO_2}$  с 1,72 до 1,82 (проектный период 2).

### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

Результаты расчетов основных характеристик конечного шлака в рассматриваемые периоды приведены в табл. 3.

Анализ этих данных показывает следующее:

– состав конечного шлака в проектных периодах изменился; в проектном периоде 1 основность  $\frac{CaO}{SiO_2}$  повысилась с 0,995 до 1,043, основность  $\frac{CaO + MgO}{SiO_2}$  – с 1,221 до 1,281 и  $\frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$  – с 0,939 до 0,974; полученный в результате изменения основности агломерата (проектный 2) конечный шлак имеет следующие

характеристики: основность  $\frac{CaO}{SiO_2}$ ,  $\frac{CaO + MgO}{SiO_2}$  и

$\frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$  составляет 1,090, 1,325 и 1,010 соответственно;

–

наблюдается повышение качества чугуна за счет роста коэффициента распределения серы ( $L_S$ ) с 37,0 до 47,7 в проектном периоде 1 и до 57,7 в проектном периоде 2; согласно расчету это позволило прогнозировать снижение содержания серы в чугуне до 0,017 % (проект 1) и 0,012 % (проект 2);

– улучшение обессеривающей способности шлака достигнуто за счет снижения вязкости шлака при температурах 1500 и 1550 °C на 0,062 и 0,046 Па·с в проектном периоде 1, на 0,096 и 0,070 Па·с в проектном периоде 2; вязкость при 1450 °C снизилась на 0,082 Па·с в проектном периоде 1 и на 0,13 Па·с в проектном периоде 2; при этом градиент вязкости  $l$  повысился незначительно (с 0,0184 до 0,0252 и до 0,0254 Па·с/°C) в проектном периоде 1 и 2, то есть ниже максимального допустимого значения 0,035 Па·с/°C.

Изменение характеристик шлакового режима при прочих равных условиях положительно сказывается на

Таблица 3

### Основные характеристики конечного шлака в рассматриваемые периоды

Table 3. Main characteristics of the final slag in the considered periods

Показатель	Период			Изменение к базовому периоду	
	Базовый	Проект 1	Проект 2	Проект 1	Проект 2
$\frac{CaO}{SiO_2}$ , ед.	0,995	1,043	1,090	0,048	0,095
$\frac{CaO + MgO}{SiO_2}$ , ед.	1,221	1,281	1,325	0,060	0,104
$\frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$ , ед.	0,939	0,974	1,010	0,035	0,071
Температура шлака, °C	1524,6	1517,7	1518,0	-6,9	-6,6
Температура шлака (при 2,5 Па·с), °C	1312,1	1318,8	1319,0	6,7	6,9
Вязкость шлака, Па·с:					
при температуре шлака	0,295	0,220	0,220	-0,074	-0,075
при 1400 °C	0,777	0,614	0,614	-0,163	-0,163
при 1450 °C	0,488	0,406	0,358	-0,082	-0,130
при 1500 °C	0,341	0,279	0,245	-0,062	-0,096
при 1550 °C	0,258	0,212	0,188	-0,046	-0,070
Приход серы, кг/т чугуна	2,97	2,94	2,94	-0,03	-0,03
Коэффициент распределения серы, ед.	37,0	47,7	57,7	10,7	20,7
Содержание серы в чугуне, %	0,021	0,017	0,012	-0,004	-0,009
Температура шлака (при 0,7 Па·с), °C	1410	1390	1390	-20	-20
Градиент вязкости $\Delta\eta_{0,7}^{2,5}$ , Па·с/°C	0,0184	0,0252	0,0254	0,0068	0,0070
Градиент вязкости $\Delta\eta_{1400}^{1500}$ , Па·с/°C	0,0044	0,0034	0,0037	-0,0010	-0,0007

газопроницаемости в зоне шлакообразования, повышается восстановительная способность газа и производительность доменной печи, снижается расход кокса.

В настоящий момент времени железорудная часть доменного цеха ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» включает агломерат, который производится на собственных аглофабриках, а также железорудные окатыши, которые поставляются с Михайловского, Лебединского, Костомукшского ГОКов и Соколовско-Сарбайского горно-обогатительного производственного объединения (ССГПО).

При увеличении доли окатышей ССГПО и Михайловского ГОКа в железорудной части шихты снижается содержание магнезии в конечном шлаке. Это связано с меньшим содержанием оксида MgO в железорудных окатышах в сравнении с агломератом, который производится на аглофабрике ММК. Это приводит к увеличению вязкости шлакового расплава и снижению его серопоглощительной способности [8, 17].

В связи с этим исследованы зависимости вязкости шлака от его основности при различном содержании оксида MgO с использованием данных, представленных в работах [18 – 20]. Анализ зависимостей показывает, что при увеличении содержания магнезии в шлаке до некоторого критического значения происходит резкое повышение его вязкости. При этом предельная концентрация оксида MgO в шлаке зависит от его основности  $\left(\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}\right)$ . Например, при концентрации оксида MgO в шлаке 8,0 % резкое увеличение вязкости шлака при температуре 1500 °C отмечается при  $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = 1,15$ ;

при концентрации оксида MgO в шлаке 10,0 % при  $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = 1,08$ , при концентрации MgO в шлаке 12,0 % сильный рост вязкости отмечается при  $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = 1,05$ ,

а при установлении концентрации магнезии в шлаке 15 % – при  $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} = 0,90$  (рис. 2, а).

Использование шлака основностью  $B_2 = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$

вместо  $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$  при построении кривых вязкости шлака от основности шлака значительно упрощает взаимосвязь указанных параметров (рис. 2, б). Кривые вязкости шлаков с содержанием оксида MgO в шлаке 8, 10 и 12 % сливаются практически в одну. При этом резкое увеличение вязкости таких шлаков наблюдается при основности  $\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$  порядка 1,32. При увеличении концентрации магнезии в шлаке до 15 % критическое значение основности шлака  $\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$  уменьшается до значения 1,25.

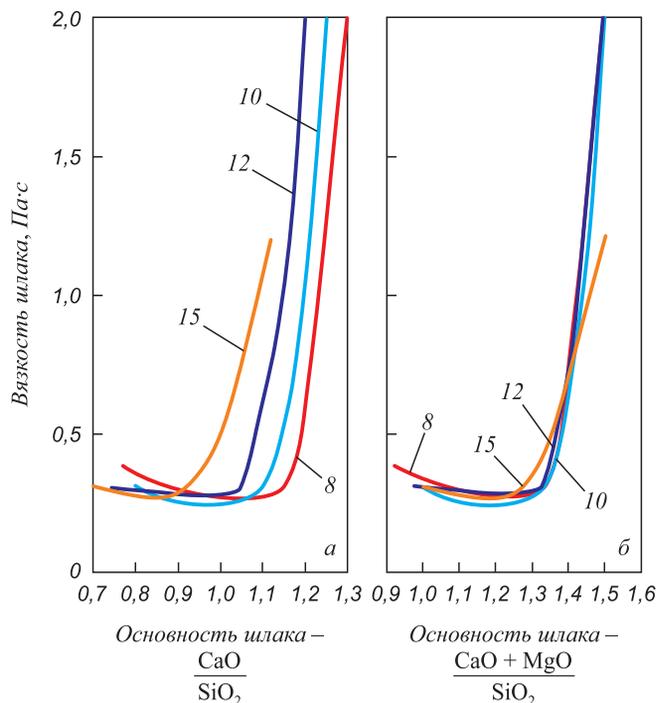


Рис. 2. Зависимость вязкости шлаков от основности шлака  $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$  (а) и  $\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$  (б) при температуре 1500 °C при разном содержании магнезии (цифры у кривых – содержание магнезии в шлаке, %)

Fig. 2. Dependence of slag viscosity on slag basicity  $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$  (a) and  $\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$  (б) at a temperature of 1500 °C with different magnesia content (the figures in the curves are magnesia content in the slag, %)

При увеличении доли окатышей в доменной шихте ММК из-за меньшего содержания оксида MgO в железорудных окатышах в сравнении с агломератом необходимо является повышение основности производимого агломерата. Получение доменного шлака с требуемым содержанием оксида MgO достигается за счет введения в аглошихту магнийсодержащих компонентов.

## Выводы

Модельная система анализа шлакового режима позволяет проводить диагностику работы доменных печей на основе фактических и расчетных данных, а также решать комплекс технологических задач в прогнозном режиме. Оптимальная основность конечного шлака, обеспечивающая максимальную его жидкоподвижность, для условий работы доменных печей ММК составляет 1,04–1,05 для соотношения  $\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2}$  и 1,30–1,32 для соотношения  $\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

- 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>
- Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спирина, В.Л. Терентьев, Л.Ю. Гилева, В.Ю. Рыболовлев, И.Е. Косаченко, В.В. Лавров, А.В. Терентьев; под ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2005. 301 с.
- Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / Н.А. Спирина, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, А.В. Краснобаев, О.П. Онорин, И.Е. Косаченко. Екатеринбург: УрФУ, 2011. 462 с.
- Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спирина, 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.
- Большаков В.И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. Киев: Наукова думка, 2007. 411 с.
- Товаровский И.Г. Доменная плавка. Днепропетровск: Пороги, 2009. 765 с.
- Гиммельфарб А.А., Котов К.И. Процессы восстановления и шлакообразования в доменных печах. М.: Металлургия, 1982. 328 с.
- Gordon Y., Izumskiy N. Mathematical model and stabilization system for slag mode of blast furnace operation. In: *Proceedings of AISTech-2017 Iron and Steel Technology Conf.*, Nashville, United States. 2017. Vol. 1. P. 797–805.
- Jia R., Deng L., Yun F., Li H., Zhang X., Jia X. Effects of SiO<sub>2</sub>/CaO ratio on viscosity, structure, and mechanical properties of blast furnace slag glass ceramics // *Materials Chemistry and Physics*. 2019. Vol. 233. P. 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.05.065>
- Shen X., Chen M., Wang N., Wang D. Viscosity property and melt structure of CaO–MgO–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–FeO slag system // *ISIJ International*. 2019. Vol. 59. No. 1. P. 9–15. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-479>
- Zheng H., Ding Y., Zhou S., Wen Q., Jiang X., Gao Q., Shen F. Viscosity prediction model for blast furnace slag with high Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // *Steel Research International*. 2021. Vol. 92. No. 1. Article 1900635. <https://doi.org/10.1002/srin.201900635>
- Jiao K., Zhang J., Liu Z., Chen C. Effect of MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio on viscosity of blast furnace primary slag // *High Temperature Materials and Processes*. 2019. Vol. 38. P. 354–361. <https://doi.org/10.1515/htmp-2018-0019>
- Gan L., Lai C. A general viscosity model for molten blast furnace slag // *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2014. Vol. 45. No. 3. P. 875–888. <https://doi.org/10.1007/s11663-013-9983-9>
- Iida T., Sakai H., Kita Y., Shigeno K. An equation for accurate prediction of the viscosities of blast furnace type slags from chemical composition // *ISIJ International*. 2000. Vol. 40. P. 110–114. [https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.suppl\\_s110](https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.suppl_s110)
- Shu Q. A viscosity estimation model for molten slags in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CaO–MgO–SiO<sub>2</sub> system // *Steel Research International*. 2009. Vol. 80. No. 2. P. 107–113. <https://doi.org/10.2374/SRI08SP085>
- Jiang D., Zhang J., Wang Z., Feng C., Jiao K., Xu R. A prediction model of blast furnace slag viscosity based on principal component analysis and k-nearest neighbor regression // *JOM*. 2020. Vol. 72. No. 11. P. 3908–3916. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04360-9>
- Pavlov A.V., Onorin O.P., Spirin N.A., Polinov A.A. MMK blast furnace operation with a high proportion of pellets in a charge. Part 1 // *Metallurgist*. 2016. Vol. 60. No. 5-6. P. 581–588. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0335-2>
- Атлас шлаков / Перевод с немецкого Г.И. Жмойдина; под ред. И.С. Куликова. М.: Металлургия, 1985. 208 с.
- 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>
- Onorin O.P., Spirin N.A., Terent'ev V.L., Gileva L.Yu., Rybolovlev V.Yu., Kosachenko I.E., Lavrov V.V., Terent'ev A.V. *Computer Methods of Blast-Furnace Process Modeling*. Spirin N.A. ed. Yekaterinburg: UGTU–UPI, 2005, 301 p. (In Russ.).
- 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 Melting: Monograph*. Yekaterinburg: UrFU, 2011, 462 p. (In Russ.).
- Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Gileva L.Yu., Krasnobaev 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.).
- BoI'shakov V.I. *Technology of Highly Efficient Energy-Saving Blast Furnace Melting*. Kiev: Naukova dumka, 2007, 411 p. (In Russ.).
- Tovarovskii I.G. *Blast Furnace Melting*. Dnepropetrovsk: Porogi, 2009, 765 p. (In Russ.).
- Gimmel'farb A.A., Kotov K.I. *Processes of Reduction and Slag Formation in Blast Furnaces*. Moscow: Metallurgiya, 1982, 328 p. (In Russ.).
- Gordon Y., Izumskiy N. Mathematical model and stabilization system for slag mode of blast furnace operation. In: *Proceedings of AISTech-2017 Iron and Steel Technology Conf.*, Nashville, United States. 2017, vol. 1, pp. 797–805.
- Jia R., Deng L., Yun F., Li H., Zhang X., Jia X. Effects of SiO<sub>2</sub>/CaO ratio on viscosity, structure, and mechanical properties of blast furnace slag glass ceramics. *Materials Chemistry and Physics*. 2019, vol. 233, pp. 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.05.065>
- Shen X., Chen M., Wang N., Wang D. Viscosity property and melt structure of CaO–MgO–SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–FeO slag system. *ISIJ International*. 2019, vol. 59, no. 1, pp. 9–15. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-479>
- Zheng H., Ding Y., Zhou S., Wen Q., Jiang X., Gao Q., Shen F. Viscosity prediction model for blast furnace slag with high Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Steel Research International*. 2021, no. 1, article 1900635. <https://doi.org/10.1002/srin.201900635>
- Jiao K., Zhang J., Liu Z., Chen C. Effect of MgO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ratio on viscosity of blast furnace primary slag. *High Temperature Materials and Processes*. 2019, vol. 38, pp. 354–361. <https://doi.org/10.1515/htmp-2018-0019>
- Gan L., Lai C. A general viscosity model for molten blast furnace slag. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2014, vol. 45, no. 3, pp. 875–888. <https://doi.org/10.1007/s11663-013-9983-9>
- Iida T., Sakai H., Kita Y., Shigeno K. An equation for accurate prediction of the viscosities of blast furnace type slags from chemical composition. *ISIJ International*. 2000, vol. 40, pp. 110–114. [https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.suppl\\_s110](https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.suppl_s110)
- Shu Q. A viscosity estimation model for molten slags in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–CaO–MgO–SiO<sub>2</sub> system. *Steel Research International*. 2009, vol. 80, no. 2, pp. 107–113. <https://doi.org/10.2374/SRI08SP085>
- Jiang D., Zhang J., Wang Z., Feng C., Jiao K., Xu R. A prediction model of blast furnace slag viscosity based on principal component analysis and k-nearest neighbor regression. *JOM*. 2020, vol. 72, no. 11, pp. 3908–3916. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04360-9>
- Pavlov A.V., Onorin O.P., Spirin N.A., Polinov A.A. MMK blast furnace operation with a high proportion of pellets in a charge. Part 1. *Metallurgist*. 2016, vol. 60, no. 5-6, pp. 581–588. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0335-2>
- Schlackenatlas*. Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Verlag Stahlisen, 1981, 282 p. (Russ. ed.: *Atlas shlakov. Sprav.* Moscow: Metallurgiya, 1985, 208 p.).

- |   |   |
|---|---|
| <p>19. Воскобойников В.Г., Дунаев Н.Е., Михалевиц А.Г. Свойства жидких доменных шлаков. М.: Металлургия, 1975. 182 с.</p> <p>20. Жило Н.Л. Формирование и свойства доменных шлаков. М.: Металлургия, 1974. 120 с.</p> | <p>19. Voskoboinikov V.G., Dunaev N.E., Mikhalevich A.G. <i>Properties of Liquid Blast Furnace Slags</i>. Moscow: Metallurgiya, 1975, 182 p. (In Russ.).</p> <p>20. Zhilo N.L. <i>Formation and Properties of Blast Furnace Slags</i>. Moscow: Metallurgiya, 1974, 120 p. (In Russ.).</p> |
|---|---|

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Александр Владимирович Павлов**, к.т.н., начальник доменного цеха, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»  
**E-mail:** pavlov.av@mmk.ru

**Aleksandr V. Pavlov**, *Cand. Sci. (Eng.)*, Chief of Blast-Furnace Shop, PJSC “Magnitogorsk Metallurgical Plant”  
**E-mail:** pavlov.av@mmk.ru

**Николай Александрович Спиринов**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой теплофизики и информатики в металлургии, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
**ORCID:** 0000-0001-6582-3428  
**E-mail:** n.a.spirin@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

**Виталий Александрович Бегинюк**, ведущий специалист доменного цеха, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат»  
**E-mail:** beginyuk.va@mmk.ru

**Vitalii A. Beginyuk**, *Leading Specialist of Blast-Furnace Shop*, PJSC “Magnitogorsk Metallurgical Plant”  
**E-mail:** beginyuk.va@mmk.ru

**Владислав Васильевич Лавров**, д.т.н., профессор кафедры теплофизики и информатики в металлургии, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
**ORCID:** 0000-0002-6953-5519  
**E-mail:** v.v.lavrov@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

**Иван Александрович Гуринов**, к.т.н., доцент кафедры теплофизики и информатики в металлургии, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
**ORCID:** 0000-0002-4989-7029  
**E-mail:** ivan.gurin@urfu.ru

**Ivan A. Gurin**, *Cand. Sci. (Eng.)*, Assist. Prof. of the Chair “Thermophysics 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

**Вклад авторов**

**CONTRIBUTION OF THE AUTHORS**

**А. В. Павлов** – создание идеи статьи; обоснование актуальности темы; проработка содержания основных разделов; подготовка примеров практической реализации современных информационных систем в промышленности.

**A. V. Pavlov** – creation of the article idea; substantiation of the topic relevance; elaboration of the content of main sections; preparation of examples of practical implementation of modern information systems in industry.

**Н. А. Спиринов** – создание идеи статьи; обоснование актуальности темы; подготовка концепции, развернутого плана и чернового варианта статьи; подбор библиографических ссылок; окончательная правка; подготовка заключения.

**N. A. Spirin** – creation of the idea of the article; substantiation of the relevance of the topic; preparation of the concept, detailed plan and draft version of the article; selection of references; final editing; preparation of the conclusion.

**В. А. Бегинюк** – проработка содержания основных разделов; подбор библиографических ссылок; оформление по требованиям редакции; переписка с соавторами и редакцией журнала; подготовка документов для отправки материалов статьи в редакцию.

**V. A. Beginyuk** – elaboration of the content of main sections; selection of references; preparation of the article documents.

**В. В. Лавров** – проработка содержания основных разделов; подготовка примеров практической реализации современных информационных систем в промышленности.

**V. V. Lavrov** – elaboration of the content of main sections; preparation of the examples of practical implementation of modern information systems in industry.

**И. А. Гуринов** – проработка содержания разделов, связанных с разработкой и программной реализацией современных информационных систем в металлургии; подготовка аннотации, ключевых слов; перевод на английский язык материалов статьи.

**I. A. Gurin** – elaboration of the content of sections related to the development and software implementation of modern information systems in metallurgy; preparation of the abstract, keywords; translation into English of the article materials.

Поступила в редакцию 22.12.2021  
 После доработки 24.01.2022  
 Принята к публикации 07.02.2022

Received 22.12.2021  
 Revised 24.01.2022  
 Accepted 07.02.2022



Оригинальная статья

УДК 621.791.042.3

DOI 10.17073/0368-0797-2022-6-421-426

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2323>

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ И МИКРОСТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ПОКРЫТИЯ, СФОРМИРОВАННОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ СИСТЕМЫ Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo

Н. А. Козырев, И. В. Осетковский, А. А. Усольцев,  
Е. В. Полевой, А. Р. Михно

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

**Аннотация.** Изучен состав неметаллических включений и микроструктура электродугового покрытия, полученного с использованием порошковой проволоки системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo. Формирование электродугового покрытия осуществлялось с помощью аппарата для автоматической дуговой сварки ASAW-1250 с использованием исследуемой порошковой проволоки. С целью снижения загрязненности наплавленного металла оксидными неметаллическими включениями в состав порошковой проволоки вводили пыль газоочистки алюминиевого производства (вместо аморфного углерода). Состав электродугового покрытия определяли с помощью спектрометра XRF-1800. Микроструктуру электродуговых покрытий изучали методом оптической микроскопии. Изучение фазового и элементного составов проводили методами сканирующей электронной микроскопии на приборе MIRA 3 LMN. Неметаллические включения в электродуговом покрытии состоят из оксидов кремния, фтора, кальция, алюминия и магния. Более темная составляющая во включении в виде прямолинейных кристаллов направлена от поверхности в глубь включения. По фазовому составу включения и более темные составляющие близки, но несколько отличаются по содержанию химических элементов. Во включении наблюдается небольшая темная составляющая округлой формы (оксиды алюминия и магния). Следы серы выделяются по контуру глобулей. Металлографический анализ поверхности показал, что микроструктура наплавленного слоя представляет собой грубоигольчатый мартенсит. Структура равномерная, имеет дендритное (столбчатое) строение, характерное для литого металла. Результаты проведенных исследований позволяют выработать мероприятия по снижению содержания неметаллических включений (элементы фтора, натрия и алюминия), которые, в свою очередь, могут неблагоприятно влиять на физико-механические свойства наплавленного слоя, например, путем использования рафинирующих добавок для снижения загрязненности наплавленного слоя неметаллическими включениями.

**Ключевые слова:** порошковая проволока, электродуговое покрытие, состав неметаллических включений, микроструктура, твердость

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-48-420003 p\_a «Развитие физико-химических и технологических основ создания принципиально нового способа сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов».

**Для цитирования:** Козырев Н.А., Осетковский И.В., Усольцев А.А., Полевой Е.В., Михно А.Р. Исследование состава неметаллических включений и микроструктуры электродугового покрытия, сформированного с использованием порошковой проволоки системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 6. С. 421–426.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-421-426>

Original article

## COMPOSITION OF NON-METALLIC INCLUSIONS AND MICROSTRUCTURE OF ELECTRIC ARC COATING FORMED USING THE FLUX-CORED WIRE OF Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo SYSTEM

N. A. Kozyrev, I. V. Osetkovskii, A. A. Usol'tsev,  
E. V. Polevoi, A. R. Mikhno

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

**Abstract.** The article considers the study of composition of the non-metallic inclusions and microstructure of the electric arc coating using the flux-cored wire of Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo system. Formation of the electric arc coating was carried out using the ASAW-1250 automatic arc welding machine by the investigated wire. In order to influence the level of contamination of the deposited metal with non-metallic oxide inclusions, aluminum gas purification

dust was introduced into the flux-cored wire (instead of amorphous carbon). Composition of the electric arc coating was determined using XRF-1800 spectrometer. Microstructure of the electric arc coatings was studied by optical microscopy. The phase and elemental compositions were studied using scanning electron microscopy on MIRA 3 LMH instrument. Non-metallic inclusions in the electric arc coating consist of oxides of silicon, fluorine, calcium, aluminum and magnesium oxides. The darker component in the inclusion, which looks like rectilinear crystals directed from the surface deep into the inclusion, has a similar phase composition, but differs somewhat in the content of chemical elements. A small dark component of a rounded shape (aluminum and magnesium oxides) is observed in the inclusion. Traces of sulfur are highlighted along the contour of the globules. Metallographic analysis of the deposited surface showed that the microstructure of the deposited layer is a coarse-needle martensite. The structure is uniform, has a dendritic (columnar) structure characteristic for cast metal. The results of the conducted investigations allow measures to be developed to reduce the content of non-metallic inclusions containing elements of fluorine, sodium and aluminum, which in turn may adversely affect the physical and mechanical properties of the deposited layer, for example, by using refining additives to reduce the contamination of the deposited layer with non-metallic inclusions.

**Keywords:** flux-cored wire, electric arc coating, composition of non-metallic inclusions, microstructure, hardness

**Funding:** The research was supported by the RFBR and the Kemerovo region within the framework of the scientific project No. 20-48-420003 p\_a "Development of physico-chemical and technological foundations for the creation of a fundamentally new method of welding differentially heat-strengthened railway rails".

**For citation:** Kozыrev N.A., Osetkovskii I.V., Usol'tsev A.A., Polevoi E.V., Mikhno A.R. Composition of non-metallic inclusions and microstructure of electric arc coating formed using the flux-cored wire of Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo system. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 6, pp. 421–426. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-421-426>

## ВВЕДЕНИЕ

Вопросам наплавки абразивно-изнашивающихся изделий в настоящее время уделяется большое внимание. Особый интерес вызывают наплавочные проволоки систем Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo типа А и В по классификации МИС [1–3], а также порошковые проволоки, основанные на тех же принципах легирования [4–6].

Рабочие поверхности технологического оборудования для снижения быстрого износа необходимо упрочнять. Формирование на рабочей поверхности технологического оборудования электродугового покрытия методом наплавки обеспечивает продление срока службы металлических изделий [7–9].

Электродуговое покрытие увеличивает срок эксплуатации оборудования, уменьшает количество запасных частей, расходы на обслуживание и увеличивает эффективность его эксплуатации [9–11].

Представляет интерес разработка технологичных наплавочных материалов [12–15], обеспечивающих в наплавленном металле структуры низкоуглеродистого мартенсита.

Перспективным направлением в создании технологичных формирований износостойких покрытий и наплавочных электродуговым способом является применение экономно-легированных технологичных наплавочных материалов [13–15]. Сдерживающим фактором развития рассматриваемого направления является отсутствие данных о зависимостях и закономерностях влияния различных факторов на структуру и свойства покрытий. Поэтому особый интерес представляют исследования, в которых изучаются микроструктура электродуговых покрытий и состав неметаллических включений, получаемых при наплавке [16].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Процессы наплавки и изготовления порошковой проволоки, а также состав наполнителя для ис-

следуемой порошковой проволоки описаны в работах [16–20].

Состав электродугового покрытия определяли с помощью спектрометра XRF-1800 [17, 18, 20]. Структурный анализ наплавленного электродугового покрытия проводили в диапазоне увеличений 100–1000 на микроскопе OLYMPUS GX-51 (в светлом поле).

Твердость наплавленного металла определяли на микротвердомере компании Qness от поверхности наплавки на образцах размером 20×20×20 мм в глубину через 1,0 мм методом Виккерса нагрузкой 49 Н (HV 5) с последующим переводом в единицы Роквелла.

С целью определения химического состава неметаллических включений в наплавленном слое, а также распределения элементов по включениям проводили исследования на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 LMH [21]. Последний позволяет проводить быстрый поиск и идентификацию по морфологии и химическому составу неметаллических включений на поверхности исследуемых металлографических шлифов, обеспечивает проведение качественного и количественного рентгеноспектрального микроанализов с помощью энергодисперсионного спектрометра, определяет химический состав микрообъемов твердого вещества, устанавливает характер распределения и состава карбидной, карбонитридной и оксидокарбидной фаз.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе определяются составы неметаллических включений в электродуговом покрытии, сформированном с использованием порошковой проволоки системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo. В работах [18–20] установлен оптимальный состав порошковой проволоки системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo для получения электродуговых покрытий, обеспечивающих требуемый уровень эксплуатационных свойств.

Для определения состава неметаллических включений в электродуговом покрытии были наплавлены

многокомпонентные слои на подложку из стали марки 09Г2С. Состав электродугового покрытия, полученного с использованием исследуемой проволоки, следующий: 0,58 % С; 0,64 % Si; 0,92 % Mn; 1,15 % Cr; 0,35 % Mo; 0,37 % Ni; 0,51 % V; 0,076 % S; 0,02 % P. Твердость электродугового покрытия 41,5 – 58,0 HRC.

При исследовании поверхности шлифа в образце выявлены в малом количестве однотипные силикатные включения глобулярного вида. Размер выявленных

включений не превышает 47 мкм. Наблюдается большое количество мелких включений сульфидов глобулярной формы диаметром до 3 мкм.

Количественный анализ химического состава включений проводили по двум выявленным включениям по двум спектрам в каждом. Результаты анализа неметаллических включений, выявленных в пробах, представлены в табл. 1 – 3.

Т а б л и ц а 1

**Химический состав неметаллического включения диаметром 33 мкм**

Table 1. Chemical composition of the nonmetallic inclusion with a diameter of 33 μm

Элемент	Количество элемента в спектре	
	1 (светлая фаза)	2 (основа)
O	49,79	O
Na	1,64	Na
Mg	9,91	Mg
Al	3,48	Al
Si	22,09	Si
S	1,37	S
Ca	1,00	Ca
Mn	10,72	Mn

Т а б л и ц а 2

**Химический состав неметаллического включения диаметром 47 мкм**

Table 2. Chemical composition of the nonmetallic inclusion with a diameter of 47 μm

Элемент	Количество элемента в спектре			
	1 (основа)	2	3 (темная фаза)	4 (контур)
O	38,40	44,12	37,05	7,12
F	13,30	–	9,61	5,94
Mg	9,12	16,94	16,32	2,75
Al	10,81	36,97	12,20	2,58
Si	14,23	–	15,37	3,67
S	–	–	–	26,03
Ca	12,12	0,17	7,80	3,92
Mn	2,02	1,79	0,62	48,00
Fe	–	–	1,02	–

Т а б л и ц а 3

**Химический состав (СЭМ)**

Table 3. Chemical composition (SEM)

Диаметр, мкм	Химический состав (СЭМ)	
	по элементам	по процентам
33	основа – Si/Mn/Mg/Al/Ca	22,0/10,7/9,9/3,5/1,6
47	основа – Si/F/Ca/Al/Mg темная фаза – Mg/Si/Al/Ca	14,2/13,3/12,0/10,8/9 16,3/15,4/12,2/7,8

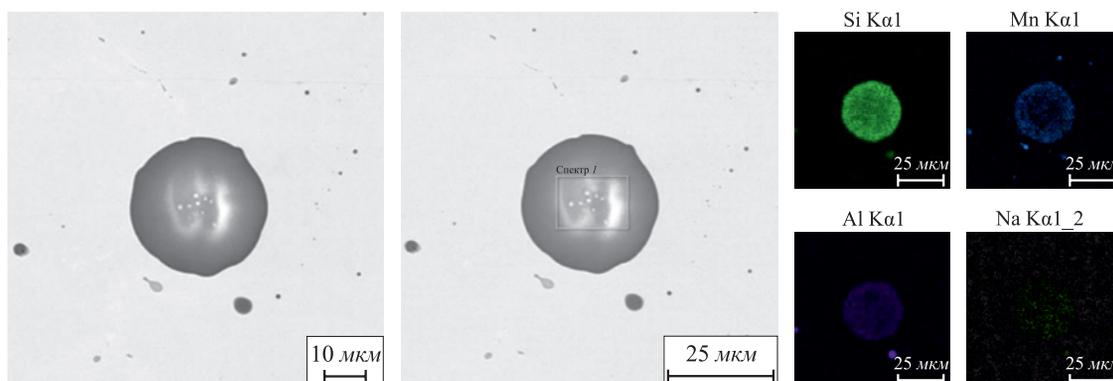


Рис. 1. Неметаллические включения диаметром 33 мкм

Fig. 1. Nonmetallic inclusions with a diameter of 33 μm in the sample

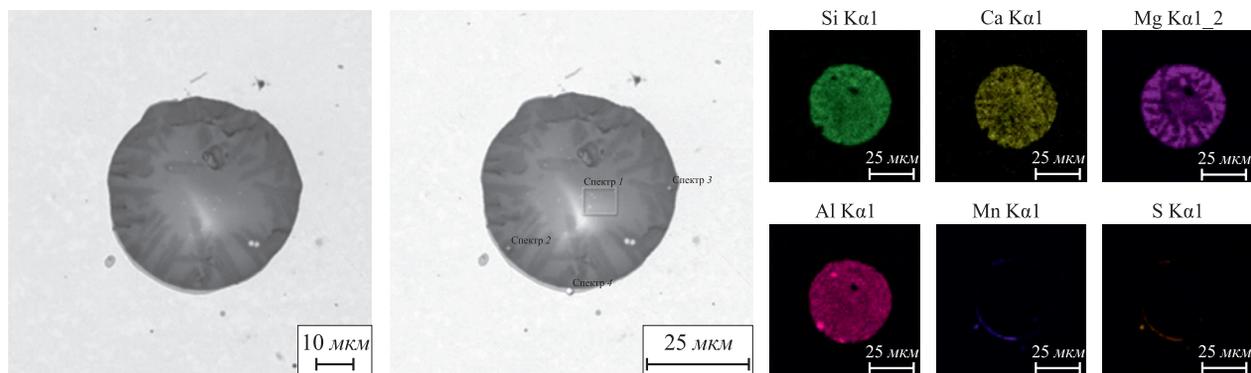


Рис. 2. Неметаллические включения диаметром 47 мкм

Fig. 2. Nonmetallic inclusions with a diameter of 47 μm in the sample

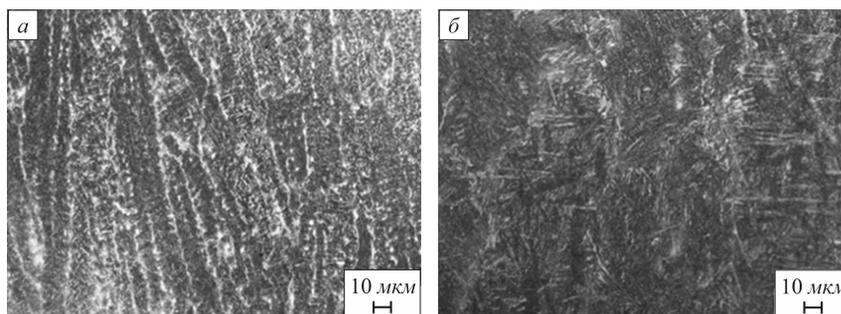


Рис. 3. Микроструктура образца

Fig. 3. Sample microstructure

Распределение элементов на выбранной площади всех включений представлено на рис. 1, 2.

Анализ химического состава включения диаметром 33 мкм в образце показал, что его фазовый состав однородный и основными составляющими являются оксиды кремния, марганца и магния, с малым содержанием алюминия и натрия (рис. 1, табл. 1).

Основа включения диаметром 47 мкм состоит из оксидов кремния, фтора, кальция, алюминия и магния. Более темная составляющая во включении в виде прямолинейных кристаллов направлена от поверхности в глубь включения. По фазовому составу включения и более темные составляющие близки, но несколько отличаются по содержанию химических элементов. Также во включении наблюдаются небольшие темные составляющие округлой формы, состоящие из оксидов алюминия и магния (рис. 2, табл. 2). Следы серы выделяются по контуру глобулей (рис. 2, табл. 2).

Металлографический анализ поверхности показал, что микроструктура наплавленного слоя представляет собой грубоигльчатый мартенсит. Структура равно-

мерная, имеет дендритное (столбчатое) строение, характерное для литого металла (рис. 3).

## Выводы

Проведенный анализ химического состава неметаллических включений указывает, что в составе покрытия, полученного электродуговым способом, присутствуют неметаллические включения, состоящие в основном из оксидов кремния, фтора, кальция, алюминия и магния. Выявленные неметаллические включения могут неблагоприятно влиять на физико-механические свойства наплавленного слоя (снижение износостойкости, хрупкость наплавленного слоя), поэтому рационально использовать рафинирующие добавки для снижения загрязненности наплавленного слоя неметаллическими включениями.

Анализ микроструктуры покрытия, полученного электродуговым способом, показывает, что структура металла представляет собой грубоигльчатый мартенсит и имеет дендритное (столбчатое) строение, характерное для литого металла.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Deng X.T., Fu T.L., Wang Z.D., Misra R.D.K., Wang G.D. Epsilon carbide precipitation and wear behaviour of low alloy wear resistant steels // *Materials Science and Technology*. 2016. Vol. 32. No. 4. P. 320–327. <https://doi.org/10.1080/02670836.2015.1137410>

1. Deng X.T., Fu T.L., Wang Z.D., Misra R.D.K., Wang G.D. Epsilon carbide precipitation and wear behaviour of low alloy wear resistant steels. *Materials Science and Technology*. 2016, vol. 32, no. 4, pp. 320–327. <https://doi.org/10.1080/02670836.2015.1137410>

2. Lim S.C., Gupta M., Goh Y.S., Seow K.C. Wear resistant WC – Co composite hard coatings // *Surface Engineering*. 1997. Vol. 13. No. 3. P. 247–250. <https://doi.org/10.1179/sur.1997.13.3.247>
3. Metlitskii V.A. Flux-cored wires for arc welding and surfacing of cast iron // *Welding International*. 2008. Vol. 22. No. 11. P. 796–800. <https://doi.org/10.1080/09507110802593646>
4. Ma H.R., Chen X.Y., Li J.W., Chang C.T., Wang G., Li H., Wang X.M., Li R.W. Fe-based amorphous coating with high corrosion and wear resistance // *Surface Engineering*. 2016. Vol. 46. No. 1. P. 1–7. <https://doi.org/10.1080/02670844.2016.1176718>
5. Natalenko V.S., Pavlov A.P. Indicators of hardness of the coating obtained by electrocontact welding composite filler materials // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2019. Vol. 2. No. 14. P. 153–156. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2019-14-153-156>
6. Kejžar R., Grum J. Hardfacing of wear-resistant deposits by MAG welding with a flux-cored wire having graphite in its filling // *Materials and Manufacturing Processes*. 2005. Vol. 20. No. 6. P. 961–976.
7. Li R., He D.Y., Zhou Z., Wang Z.J., Song X.Y. Wear and high temperature oxidation behavior of wire arc sprayed iron based coatings // *Surface Engineering*. 2014. Vol. 30. No. 11. P. 784–790. <https://doi.org/10.1179/1743294414Y.0000000331>
8. Сказочкин А.В., Бондаренко Г.Г., Жуковский П. Особенности измерения твердости металлической поверхности, модифицированной ультрадисперсными частицами минералов // *Приборы и методы измерений*. 2020. Т. 11. № 3. С. 212–221. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2020-11-3-212-221>
9. Zhuk Yu. Super-hard wear-resistant coating systems // *Materials Technology*. 1999. Vol. 14. No. 3. P. 126–129. <https://doi.org/10.1080/10667857.1999.11752827>
10. Hardell J., Yousfi A., Lund M., Pelcastre L., Prakash B. Abrasive wear behaviour of hardened high strength boron steel // *Tribology – Materials, Surfaces & Interfaces*. 2014. Vol. 8. No. 2. P. 90–97. <https://doi.org/10.1179/1751584X14Y.0000000068>
11. Kirchgäßner M., Badisch E., Franek F. Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact // *Wear Journal*. 2008. Vol. 265. No. 5–6. P. 772–779. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.004>
12. Луговая В.А., Ярошик В.В. Особенности наплавки композиционных сплавов при упрочнении рабочих поверхностей тел вращения // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. 2015. Вып. 40 (59). С. 166–173.
13. Еремин А.Е., Еремин Е.Н., Филиппов Ю.О., Маталасова А.Е., Кац В.С. Структура и свойства высокохромистого металла запорной арматуры наплавленного серийно выпускаемыми сварочными проволоками // *Омский научный вестник*. 2014. Вып. 1 (127). С. 55–58.
14. Тепляшин М.В., Комков В.Г., Стариенко В.А. Разработка экономнолегированного сплава для восстановления бил молотковых мельниц // *Ученые заметки ТОГУ*. 2013. Т. 4. № 4. С. 1543–1549.
15. Емелюшин А.Н., Петроченко Е.В., Нefeld'ev С.П. Исследование структуры и ударно-абразивной износостойкости покрытий системы Fe – C – Cr – Mn – Si, дополнительно легированных азотом // *Сварочное производство*. 2011. № 10. С. 18–22.
16. Гусев А.И., Романов Д.А., Козырев Н.А., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф. Структура сварного шва износостойкой наплавки порошковой проволокой системы Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2021. № 2 (36). С. 3–11.
17. Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Гусев А.И., Осетковский И.В. Эксплуатационные показатели новых порошковых проволок Fe–C–Si – Mn – Cr – Ni – Mo для наплавки защитных пластин шнеков очистных комбайнов // *Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов*. 2019. № 5. С. 195–202.
18. Осетковский И.В., Козырев Н.А., Гусев А.И., Крюков Р.Е., Попова М.В. Износостойкость металла, наплавленного порошковыми проволоками систем Fe – C – Si – Mn – Ni – Mo – W – V
2. Lim S.C., Gupta M., Goh Y.S., Seow K.C. Wear resistant WC – Co composite hard coatings. *Surface Engineering*. 1997, vol. 13, no. 3, pp. 247–250. <https://doi.org/10.1179/sur.1997.13.3.247>
3. Metlitskii V.A. Flux-cored wires for arc welding and surfacing of cast iron. *Welding International*. 2008, vol. 22, no. 11, pp. 796–800. <https://doi.org/10.1080/09507110802593646>
4. Ma H.R., Chen X.Y., Li J.W., Chang C.T., Wang G., Li H., Wang X.M., Li R.W. Fe-based amorphous coating with high corrosion and wear resistance. *Surface Engineering*. 2016, vol. 46, no. 1, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1080/02670844.2016.1176718>
5. Natalenko V.S., Pavlov A.P. Indicators of hardness of the coating obtained by electrocontact welding composite filler materials. *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2019, vol. 2, no. 14, pp. 153–156. <https://doi.org/10.26160/2474-5901-2019-14-153-156>
6. Kejžar R., Grum J. Hardfacing of wear-resistant deposits by MAG welding with a flux-cored wire having graphite in its filling. *Materials and Manufacturing Processes*. 2005, vol. 20, no. 6, pp. 961–976.
7. Li R., He D.Y., Zhou Z., Wang Z.J., Song X.Y. Wear and high temperature oxidation behavior of wire arc sprayed iron based coatings. *Surface Engineering*. 2014, vol. 30, no. 11, pp. 784–790. <https://doi.org/10.1179/1743294414Y.0000000331>
8. Skazochkin A.B., Bondarenko G.G., Zhukovskii P. Features of measuring the hardness of a metal surface modified with ultrafine particles of minerals. *Devices and Methods of Measurements*. 2020, vol. 11, no. 3, pp. 212–221. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2020-11-3-212-221>
9. Zhuk Yu. Super-hard wear-resistant coating systems. *Materials Technology*. 1999, vol. 14, no. 3, pp. 126–129. <https://doi.org/10.1080/10667857.1999.11752827>
10. Hardell J., Yousfi A., Lund M., Pelcastre L., Prakash B. Abrasive wear behaviour of hardened high strength boron steel. *Tribology – Materials, Surfaces & Interfaces*. 2014, vol. 8, no. 2, pp. 90–97. <https://doi.org/10.1179/1751584X14Y.0000000068>
11. Kirchgäßner M., Badisch E., Franek F. Behaviour of iron-based hardfacing alloys under abrasion and impact. *Wear Journal*. 2008, vol. 265, no. 5–6, pp. 772–779. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.004>
12. Lugovaya V.A., Yaroshik V.V. Features of surfacing of composite alloys during hardening of working surfaces of rotation bodies. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2015, no. 40 (59), pp. 166–173. (In Russ.).
13. Eremin A.E., Eremin E.N., Filippov Yu.O., Matalasova A.E., Kats V.S. Structure and properties of high-chromium metal of shut-off valves deposited with mass-produced welding wires. *Omskii nauchnyi vestnik*. 2014, no. 1 (127), pp. 55–58. (In Russ.).
14. Teplyashin M.V., Komkov V.G., Starienko V.A. Development of an economically doped alloy for restoration of hammer mill bits. *Uchenye zametki TOGU*. 2013, vol. 4, no. 4, pp. 1543–1549. (In Russ.).
15. Emelyushin A.N., Petrochenko E.V., Nefed'ev S.P. Investigation of structure and impact-abrasive wear resistance of coatings of Fe–C–Cr–Mn–Si systems additionally alloyed with nitrogen. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2011, no. 10, pp. 18–22. (In Russ.).
16. Gusev A.I., Romanov D.A., Kozyrev N.A., Gromov V.E., Ivanov Yu.F. Structure of the weld of wear-resistant surfacing with a flux-cored wire of Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo system. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2021, no. 2 (36), pp. 3–11. (In Russ.).
17. Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Gusev A.I., Osetkovskii I.V. Performance indicators of new Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo flux-cored wire for surfacing protective plates of augers of cleaning combines. *Naukiemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov*. 2019, no. 5, pp. 195–202. (In Russ.).
18. Osetkovskii I.V., Kozyrev N.A., Gusev A.I., Kryukov R.E., Popova M.V. Wear resistance of metal deposited with powder wires of Fe–C–Si–Mn–Ni–Mo–W–V and Fe–C–Si–Mn–Cr–Ni–Mo–V

- и Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo – V // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2017. № 4 (22). С. 21–24.
19. Пат. 2641590 РФ. МПК8 B23 K35/36 В 23 K35/36 Порошковая проволока / Козырев Н.А., Гусев А.И., Галевский Г.В., Крюков Р.Е., Осетковский И.В., Усольцев А.А., Козырева О.А.; заявл. 22.06.2016; опубл. 18.01.2018. Бюл. № 2.
  20. Гусев А.И., Козырев Н.А., Кибко Н.В., Попова М.В., Осетковский И.В. Исследование свойств порошковой проволоки системы Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – V – Co для упрочнения узлов и деталей оборудования горнорудной и угледобывающей отрасли // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2017. № 3. С. 135–140.
  21. Мамонтов М.М., Коновалов А.Н., Полевой Е.В., Шелухин А.А. Выявление внутренних дефектов в готовых рельсах // Путь и путевое хозяйство. 2018. № 7. С. 2–6.
  19. Kozyrev N.A., Gusev A.I., Galevskii G.V., Kryukov R.E., Osetkovskii I.V., Usol'tsev A.A., Kozyreva O.A. Flux-cored wire. Patent RF no. 2641590 MPK8 B23 K35/36 В 23 K35/36. *Byulleten' izobretenii*. 2018, no. 2. (In Russ.).
  20. Gusev A.I., Kozyrev N.A., Kibko N.V., Popova M.V., Osetkovskii I.V. Investigation of properties of the flux-cored wire of Fe – C – Si – Mn – Cr – Mo – Ni – V – Co system for hardening of nodes and parts of equipment of mining and coal mining industries. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov*. 2017, no. 3, pp. 135–140. (In Russ.).
  21. Mamontov M.M., Konovalov A.N., Polevoi E.V., Shelukhin A.A. Identification of internal defects in finished rails. *Put' i putevoe khozyaistvo*. 2018, no. 7, pp. 2–6. (In Russ.).

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Николай Анатольевич Козырев**, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0002-7391-6816  
**E-mail:** kozyrev\_na@mtsp.sibsiu.ru

**Nikolai A. Kozyrev**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Vice-Rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0002-7391-6816  
**E-mail:** kozyrev\_na@mtsp.sibsiu.ru

**Иван Васильевич Осетковский**, аспирант кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства, Сибирский государственный индустриальный университет  
**E-mail:** dadlic@mail.ru

**Ivan V. Osetkovskii**, Postgraduate of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production", Siberian State Industrial University  
**E-mail:** dadlic@mail.ru

**Александр Александрович Усольцев**, к.т.н., доцент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0001-6220-7910  
**E-mail:** a.us@rambler.ru

**Aleksandr A. Usol'tsev**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production", Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0001-6220-7910  
**E-mail:** a.us@rambler.ru

**Егор Владимирович Полевой**, к.т.н., начальник бюро металловедения и термической обработки технического отдела рельсовой площадки, АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»  
**E-mail:** egor.polevoj@evraz.com

**Egor V. Polevoi**, Cand. Sci. (Eng.), Head of Bureau of Metal Science and Heat Treatment of Technical Department of the Rail Site, JSC "EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant"  
**E-mail:** egor.polevoj@evraz.com

**Алексей Романович Михно**, аспирант кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0002-7305-6692  
**E-mail:** mikno-mm131@mail.ru

**Aleksei R. Mikhno**, Postgraduate of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production", Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0002-7305-6692  
**E-mail:** mikno-mm131@mail.ru

#### ВКЛАД АВТОРОВ

#### CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Н. А. Козырев** – формирование основной идеи исследований, разработка методологии работы, анализ результатов исследований.

**N. A. Kozyrev** – formation of the main idea and methodology of the research, analysis of the research results.

**И. В. Осетковский** – выполнение металлографических исследований, анализ результатов исследований.

**I. V. Osetkovskii** – performance of metallographic studies, analysis of the research results.

**А. А. Усольцев** – разработка плана исследований, организация испытаний образцов, сбор данных исследований, анализ результатов исследований.

**A. A. Usol'tsev** – development of the research plan, organization of the sample testing, collection of the research data, analysis of the research results.

**Е. В. Полевой** – формирование основной идеи исследований, разработка плана исследований, постановка задач, анализ результатов исследований.

**E. V. Polevoi** – formation of the main idea and plan of the research, formulation of the tasks, analysis of the research results.

**А. Р. Михно** – исследование образцов на электронном микроскопе, анализ результатов исследований, подготовка материалов для статьи.

**A. R. Mikhno** – examination of the samples on an electron microscope, analysis of the research results, preparation of materials for the article.

Поступила в редакцию 23.02.2022  
 После доработки 09.03.2022  
 Принята к публикации 11.03.2022

Received 23.02.2022  
 Revised 09.03.2022  
 Accepted 11.03.2022



Оригинальная статья

УДК 536.425:539.25:539.531

DOI 10.17073/0368-0797-2022-6-427-433

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2324>

## ФРАКТОГРАФИЯ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА CrMnFeCoNi ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКИ

В. Е. Громов<sup>1</sup>, Ю. Ф. Иванов<sup>1,2</sup>, К. А. Осинцев<sup>1,3</sup>,  
С. В. Воробьев<sup>1</sup>, И. А. Панченко<sup>1</sup>

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

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

<sup>3</sup> Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34)

**Аннотация.** В последнее десятилетие внимание ученых в области физического материаловедения привлечено к изучению высокоэнтропийных сплавов. По технологии проволоочно-дугового аддитивного производства (WAAM) получен высокоэнтропийный сплав (ВЭС) неэквивалентного состава. В двух состояниях (исходном/после изготовления и после электронно-пучковой обработки (ЭПО)) были проанализированы деформационные кривые, полученные на установке Instron 3369 при одноосном растяжении со скоростью 1,2 мм/мин при комнатной температуре. Электронно-пучковую обработку проводили с целью выявления ее влияния на структурно-фазовые состояния и механические свойства. Такая обработка приводит к снижению прочностных и пластических свойств ВЭС. С помощью сканирующего электронного микроскопа LEO EVO 50 выполнен анализ структуры поверхности разрушения и приповерхностной зоны. Выявлены зависимости предела прочности и относительного удлинения до разрушения от параметров ЭПО. Прочность и пластичность немонотонно снижаются с ростом плотности энергии пучка электронов в диапазоне 10 – 30 Дж/см<sup>2</sup> при постоянных значениях длительности, частоты и количества импульсов. Наряду с ямочным характером излома выявлено наличие микропор, микрорасслоений. Исследование поверхности разрушения ВЭС после ЭПО кроме областей с вязким механизмом разрушения выявило области с полосовой (пластинчатой) структурой. При плотности энергии пучка электронов 10 Дж/см<sup>2</sup> площадь такой структуры составляет 25 %, она немонотонно растет до 65 % при плотности энергии пучка электронов 30 Дж/см<sup>2</sup>. Диаметр ямок отрыва в полосах разрушения изменяется в пределах 0,1 – 0,2 мкм, что значительно меньше размера ямок отрыва остальной части образцов ВЭС. После ЭПО толщина расплавленного слоя изменяется в пределах 0,8 – 5,0 мкм и возрастает с ростом плотности энергии пучка электронов. Электронно-пучковая обработка приводит к образованию ячеек кристаллизации, размеры которых изменяются в пределах 310 – 800 нм при росте плотности энергии пучка электронов от 15 до 30 Дж/см<sup>2</sup>. Высказано предположение, что образующиеся при ЭПО дефекты в поверхностных слоях могут быть одной из причин снижения прочности и пластичности ВЭС.

**Ключевые слова:** высокоэнтропийный сплав CrMnFeCoNi, электродуговая аддитивная технология, импульсный электронный пучок, испытание на растяжение, структура поверхности разрушения

**Финансирование:** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 20-19-00452 (получение высокоэнтропийного сплава, проведение электронно-пучковой обработки и механических испытаний) и в рамках государственного задания (шифр темы 0809-2021-0013) (фрактография поверхности разрушения высокоэнтропийного сплава).

**Для цитирования:** Громов В.Е., Иванов Ю.Ф., Осинцев К.А., Воробьев С.В., Панченко И.А. Фрактография поверхности разрушения высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi после электронно-пучковой обработки // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 6. С. 427–433. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-427-433>

Original article

## FRAC TOG RAPHY OF FRACTURE SURFACE OF CRMNFECONI HIGH-ENTROPY ALLOY AFTER ELECTRON-BEAM PROCESSING

V. E. Gromov<sup>1</sup>, Yu. F. Ivanov<sup>1,2</sup>, K. A. Osintsev<sup>1,3</sup>,  
S. V. Vorob'ev<sup>1</sup>, I. A. Panchenko<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

<sup>3</sup> Samara National Research University (34 Moskovskoe Route, Samara 443086, Russian Federation)

**Abstract.** In the past decade the attention of scientists in the field of physical materials science is attracted to studying the high-entropy alloys. By the technology of wire-arc additive manufacturing (WAAM) a high-entropy alloy (HEA) of a nonequiatomic composition was obtained. Deformation curves obtained under uniaxial tension at a rate of 1.2 mm/min at room temperature using Instron 3369 unit were analyzed in two states: initial/after fabrication and after electron-beam treatment (EBT). EBT was conducted to detect its influence on structural-phase states and mechanical properties. The EBP leads to a decrease in strength and plastic properties of the HEA. By means of scanning electron microscope LEO EVO 50, analysis of structure of fracture surface and the near-surface zone was performed. Dependences of the ultimate strength and relative elongation to failure on EBT parameters were revealed, and it was shown that values of strength and plasticity decrease nonmonotonically with an increase in electron beam energy density in the range  $E_S = 10 - 30 \text{ J/cm}^2$  at constant values of duration, frequency, and number of pulses. Along with a pit character of the fracture a presence of micropores and microlayering was detected. Investigation of the HEA's fracture surface after EBP except for areas with a ductile fracture mechanism revealed the regions with a band (lamellar) structure. At  $E_S = 10 \text{ J/cm}^2$ , the area of such structure is 25 %; it increases nonmonotonically to 65 % at  $E_S = 30 \text{ J/cm}^2$ . The diameter of pits of detachment in fracture bands varies in the limits of 0.1 – 0.2  $\mu\text{m}$ , which is considerably less than that in the remainder of the HEA samples. After EBP the thickness of the molten layer varies in the limits of 0.8 – 5.0  $\mu\text{m}$  and grows with an increase in the energy density of electron beam. EBT leads to generation of crystallization cells, the sizes of which change within the range 310 – 800 nm as  $E_S$  increases from 15 to 30  $\text{J/cm}^2$ . It is suggested that the defects being formed in surface layers in EBP may be the reason for decreasing the HEA's maximum values of strength and plasticity.

**Keywords:** CrMnFeCoNi high-entropy alloy, wire arc additive manufacturing, pulsed electron-beam, tensile tests, fracture surface structure

**Funding:** The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation (project No. 20-19-00452) (fabrication of the high-entropy alloy, electron beam treatment and conducting of the mechanical tests) and within the framework of the state assignment (subject code 0809-2021-0013) (fractography of the fracture surface of the high-entropy alloy).

**For citation:** Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A., Vorob'ev S.V., Panchenko I.A. Fractography of fracture surface of CrMnFeCoNi high-entropy alloy after electron-beam processing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 6, pp. 427–433. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-427-433>

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из фундаментальных и практически ориентированных задач физики конденсированного состояния и физического материаловедения является разработка физических основ создания новых металлических материалов, обладающих комплексом необходимых физико-механических и эксплуатационных свойств, и технологий их получения [1 – 4].

В последние годы внимание ученых привлекает новая система сплавов, известная как высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) [5 – 8]. В отличие от традиционных высокоэнтропийные сплавы состоят из пяти и более основных элементов с содержанием от 5 до 35 % (ат.) [9 – 14]. Особенность высокоэнтропийных сплавов заключается в том, что атомы всех элементов считаются атомами растворенного вещества, вызывают деформацию кристаллической структуры и улучшают термодинамическую стабильность свойств, связанных с различиями в атомных радиусах компонентов. Это приводит к высокой энтропии системы и возможности дальнейшего производства материалов с уникальными свойствами, которые невозможно получить традиционными методами микролегирования [15 – 18].

Оригинальные результаты, полученные в области ВЭС, подробно рассмотрены в аналитических обзорах и монографиях [1, 19 – 23], где описаны микроструктура, свойства, термодинамика ВЭС, рассмотрены результаты моделирования их структуры и обсуждены новые варианты методов получения многокомпонентных сплавов. Ранее в работах [1, 22] было показано, что из-за использования различных методов получения ВЭС, содержащих химические элементы с разными атомными радиусами, возможно образование наноструктур и даже аморфного состояния.

В настоящее время разрабатываются практически все типы таких сплавов (конструкционные, крио- и жаропрочные, коррозионностойкие, с особыми магнитными и электрическими свойствами) и соединений (карбиды, нитриды, оксиды, бориды, силициды) [16]. Улучшение свойств материалов может быть достигнуто путем обработки поверхности концентрированными потоками энергии. Основной особенностью упрочнения материалов концентрированными потоками энергии (в сравнении с методами традиционной термической и химико-термической обработки) является наноструктурирование их поверхностных слоев. Это означает снижение масштабного уровня локализации пластической деформации поверхности, что приводит к более равномерному распределению упругих напряжений вблизи нее при воздействии эксплуатационных факторов. Повышение прочности и пластичности при этом будет обусловлено уменьшением числа субмикротрещин в поверхностных слоях.

Среди многочисленных методов поверхностной модификации поверхности и ее упрочнения особое место занимает электронно-пучковая обработка (ЭПО) [24, 25], которая обеспечивает сверхвысокие (до  $10^6 \text{ K/c}$ ) скорости нагрева поверхностного слоя до заданных температур и охлаждение поверхностного слоя за счет теплоотвода в основной объем материала со скоростями  $10^4 - 10^9 \text{ K/c}$ . В результате в поверхностном слое образуются неравновесные субмикро- и нанокристаллические структурно-фазовые состояния.

Целью настоящей работы является анализ поверхности разрушения высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi, изготовленного методом электродуговой аддитивной технологии и подвергнутого деформации растяжением в исходном и в облученном импульсным электронным пучком состоянии.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Высокоэнтропийный сплав неэквивалентного состава CrMnFeCoNi был изготовлен методом электродуговой аддитивной технологии (WAAM) [22]. Для получения образцов в качестве исходного материала была использована трехжильная проволока, состоящая из чистой ( $\approx 99,9\%$  Co (здесь и далее атом.)) кобальтовой проволоки диаметром 0,47 мм; сварочной проволоки Autrod 16.95 (65,3 % Fe, 19,6 % Co, 7,3 % Ni, 1,6 % Si, 6,2 % Mn), которая была предварительно утонена в диаметре с 0,80 до 0,74 мм; хромоникелевой проволоки Ni80Cr20 (22,5 % Cr, 1,5 % Fe, 72,1 % Ni, 0,8 % Al, 2,9 % Si, 0,2 % Mn) диаметром 0,4 мм. Исходные проволоки были скручены с помощью специального скручивающего устройства. Детальная методика электродуговой аддитивной технологии получения ВЭС системы Co–Cr–Fe–Mn–Ni с указанием режима нанесения слоев и их размеров представлена в работе [22]. Механические испытания были проведены в соответствии

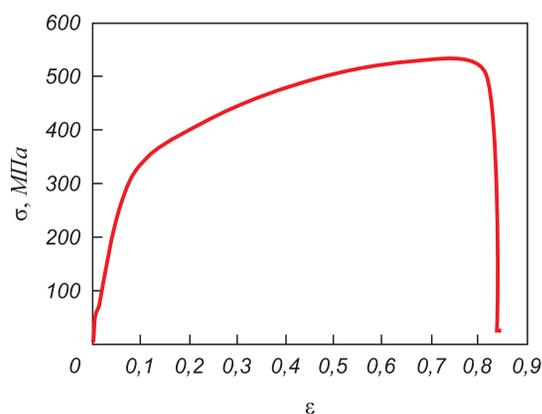


Рис. 1. Деформационная кривая, полученная при одноосном растяжении ВЭС в исходном состоянии

Fig. 1. Deformation curve obtained by HEA uniaxial stretching in the initial state

с ГОСТ 1497 – 84 [26]. Образцы для исследований вырезали из массивной заготовки методами электроэрозионной резки. Размеры образцов перед испытаниями: толщина 1,05 мм; ширина 4,4 мм; длина рабочей части 8,0 мм. Часть образцов облучали с двух сторон (рабочая часть) в среде аргона на установке «СОЛЮ», разработанной и изготовленной в «Институте сильноточной электроники СО РАН» [27] по режимам: плотность энергии пучка электронов  $E_s = 10 \div 30$  Дж/см<sup>2</sup>, длительность импульса пучка 50 мкс, количество импульсов 3, частота 0,3 с<sup>-1</sup>. Запись деформационных кривых при растяжении со скоростью 1,2 мм/мин проводили на установке Instron 3369. С помощью сканирующего электронного микроскопа LEO EVO 50 анализировали структуру поверхности разрушения и поверхностных слоев.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сплав в исходном состоянии имеет неэквивалентный состав и содержит 15,5 % Cr, 3,1 % Mn, 38,9 % Fe, 24,6 % Co, 17,9 % Ni. Облучение данного сплава импульсным электронным пучком не привело к существенному изменению элементного состава материала. Методами микрорентгеноспектрального анализа тонких фольг выявлен следующий элементный состав поверхностного слоя: 15,5 % Cr, 2,5 % Mn, 37,6 % Fe, 26,3 % Co, 18,1 % Ni.

Типичная деформационная кривая при растяжении ВЭС в исходном состоянии приведена на рис. 1. Отчетливо видно, что испытываемые образцы обладают высокой (более 80 %) пластичностью и прочностью при разрыве (более 500 МПа).

Электронно-микроскопический анализ поверхности разрушения ВЭС наряду с вязким ямочным характером излома (рис. 2, а) выявил присутствие в материале микропор, микрорасслоений и пустот (рис. 2, б). Весьма часто указанные дефекты материала располагаются на изломе в виде протяженных полос. Можно предпо-

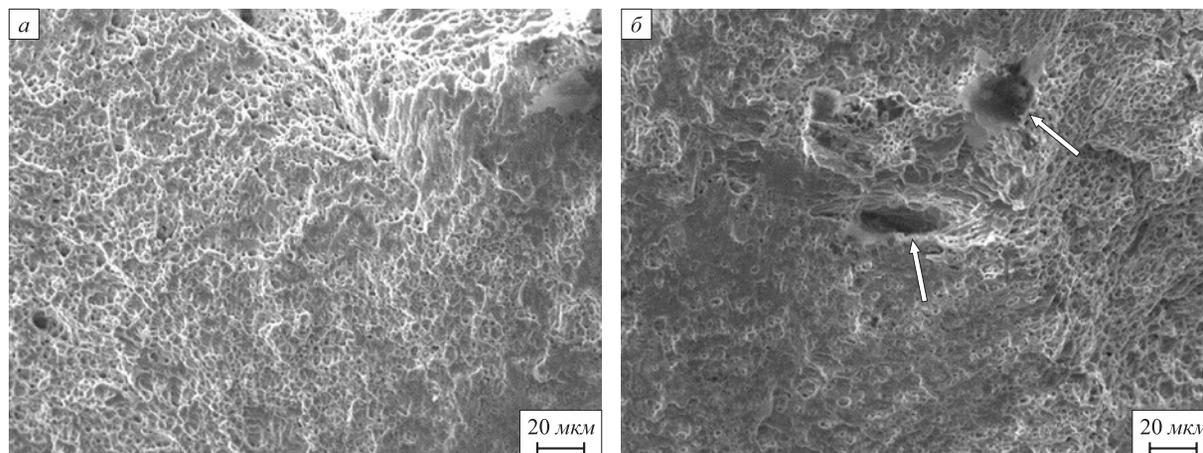


Рис. 2. Поверхность разрушения (а) и микропоры (б), формирующиеся при разрушении ВЭС

Fig. 2. Fracture surface (a) and micropores (b) formed during the HEA fracture

ложить, что такое расположение дефектов обусловлено методом изготовления объемного материала.

Двухстороннее облучение рабочей поверхности образцов для растяжения приводит к снижению прочностных и пластических свойств ВЭС. Предельные значения прочности и пластичности облученных образцов изменяются коррелированным образом соответственно результатам, приведенным на рис. 3.

Исследования поверхности разрушения образцов, предварительно облученных импульсным электронным пучком, выявили наличие наряду с областями, разрушенными по вязкому механизму, областей материала, при разрушении которых формируется полосовая (пластинчатая) структура.

Полосы разрушения в большинстве случаев пересекают образец от верхней до нижней кромки и располагаются под углом 90 или 45° к поверхности образца. Разрушение образца в полосах также протекает по вязкому механизму. Диаметр ямок отрыва в полосах разрушения изменяется в пределах 0,1 – 0,2 мкм, что почти на порядок меньше диаметра ямок вязкого отрыва остальной части образца.

Выполненные исследования показали, что в образце, не облученном импульсным электронным пучком, полосы разрушения материала не формируются. В облученном сплаве размер области материала, разрушение которого произошло с образованием полосовой структуры, увеличивается с ростом плотности энергии пучка электронов, а именно, при  $E_s = 10$  Дж/см<sup>2</sup> области с полосовой структурой занимают примерно 25 % площади излома, при  $E_s = 30$  Дж/см<sup>2</sup> – примерно 65 %. Можно предположить, что формирование полосовой структуры при разрушении ВЭС является одной из причин снижения предельной прочности и пластичности материала в облученном состоянии (рис. 3).

Облучение металлов и сплавов импульсным электронным пучком, как правило, приводит к формирова-

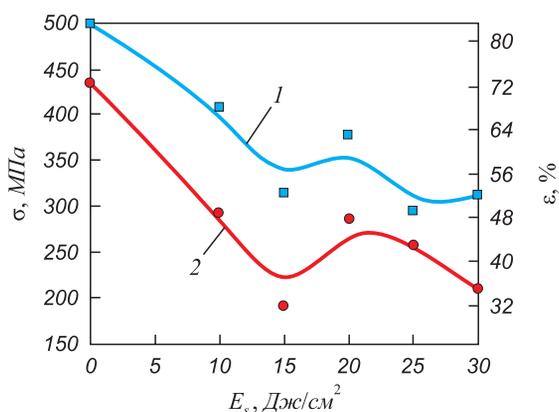


Рис. 3. Зависимость предела прочности (1) и относительного удлинения (2) до разрушения от плотности энергии пучка электронов

Fig. 3. Dependence of the tensile strength (1) and elongation (2) before fracture on electron beam energy density

нию в поверхностном слое образца структуры высокоскоростной ячеистой кристаллизации [23 – 25]. При  $E_s = 10$  Дж/см<sup>2</sup> поверхностный слой ВЭС не плавится. Дальнейшее увеличение  $E_s$  в диапазоне 15 – 30 Дж/см<sup>2</sup> приводит к росту размера ячеек кристаллизации в интервале 310 – 800 нм.

Исследования поверхности разрушения образцов ВЭС позволили оценить толщину расплавленного слоя и рассмотреть состояние пограничного (расплав – твердое тело) слоя, формирующегося при высокоскоростной кристаллизации материала, реализующейся в результате облучения импульсным электронным пучком. При плотности энергии пучка электронов 15 Дж/см<sup>2</sup> толщина расплавленного слоя составляет 0,8 мкм, а при  $E_s = 30$  Дж/см<sup>2</sup> – 5 мкм.

Размеры кристаллитов слоя практически совпадают с размерами ячеек кристаллизации. Модифицированный электронным пучком объем ВЭС имеет двухслойное строение (рис. 4). На расстоянии примерно до 4 мкм

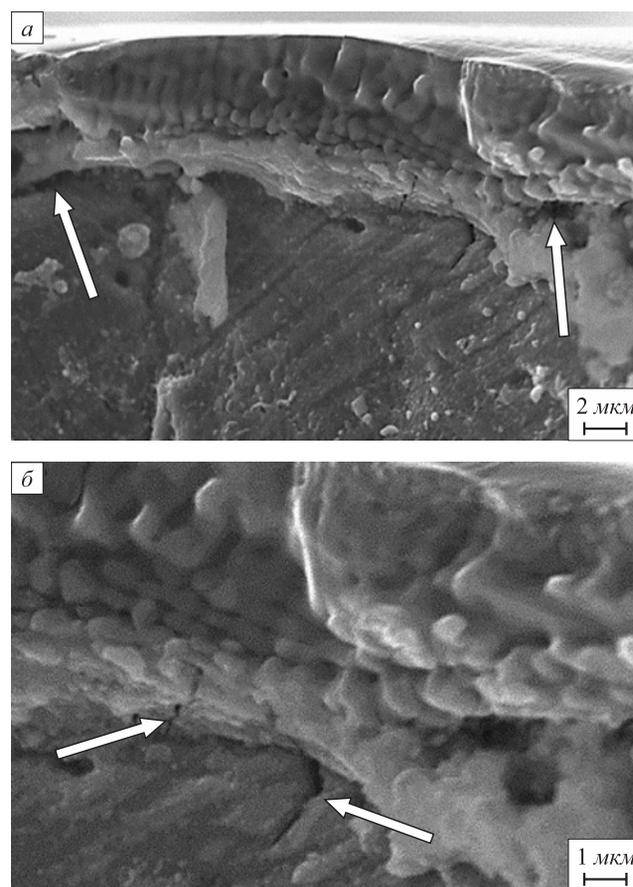


Рис. 4. Структура высокоскоростной ячеистой кристаллизации, формирующаяся в поверхностном слое ВЭС при облучении импульсным электронным пучком при  $E_s = 30$  Дж/см<sup>2</sup> (стрелками на поз. а обозначены микропоры, на поз. б – микротрещины)

Fig. 4. Structure of high-speed cellular crystallization formed in the HEA surface layer when irradiated with a pulsed electron beam at  $E_s = 30$  J/cm<sup>2</sup> (on a – arrows indicate micropores, on б – microcracks)

от поверхности (первый слой) обнаружены микропоры (рис. 4, а), а на расстоянии примерно 6 мкм (граница второго слоя с подложкой) – микропоры и микротрещины, расположенные преимущественно перпендикулярно к поверхности образца (рис. 4, б). Можно предположить, что дефекты, выявленные в поверхностном и подповерхностном слоях, формируются в результате упругих напряжений, которые возникают при высокоскоростной закалке образцов после завершения термического воздействия пучка электронов. Такие дефекты также могут быть причиной снижения предельной прочности и пластичности материала в облученном состоянии.

## Выводы

Установлено, что образцы ВЭС CrMnFeCoNi в исходном состоянии обладают высокой пластичностью (относительное удлинение до разрушения более 80 %) и прочностью (предел прочности более 500 МПа). Разрушение исходных и облученных образцов ВЭС протекает по вязкому механизму. Электронно-пучковая обработка рабочей поверхности приводит к снижению параметров прочности и пластичности ВЭС. В диапазоне плотности энергии пучка электронов 10 – 30 Дж/см<sup>2</sup>

предел прочности и относительное удлинение до разрушения немонотонно уменьшаются. При разрушении ВЭС на поверхности образуется полосовая структура, площадь которой достигает 65 % при плотности энергии пучка электронов 30 Дж/см<sup>2</sup>. Разрушение образцов в полосах также протекает по вязкому механизму. Диаметр ямок отрыва в полосах разрушения изменяется в пределах 0,1 – 0,2 мкм, что почти на порядок меньше диаметра ямок вязкого отрыва остальной части образца. При плотности энергии пучка электронов более 15 Дж/см<sup>2</sup> поверхностный слой начинает расплавляться, его толщина достигает 5 мкм при  $E_S = 30$  Дж/см<sup>2</sup>. Фрактографический анализ поверхностного слоя разрушения показал его разделение на два слоя, в которых имеются микропоры и микротрещины, расположенные перпендикулярно поверхности материала. Высказано предположение, что выявленные в поверхностном и подповерхностном слоях дефекты формируются в результате упругих напряжений, возникающих при высокоскоростной закалке образцов после завершения термического воздействия пучка электронов. Данные дефекты могут быть одной из причин снижения предельной прочности и пластичности материала в облученном состоянии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

- George E.P., Curtin W.A., Tسان C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms // *Acta Materialia*. 2020. Vol. 188. P. 435–474. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.015>
- Shivam V., Basu J., Pandey V.K., Shadangi Y., Mukhopadhyay N.K. Alloying behaviour, thermal stability and phase evolution in quinary AlCoCrFeNi high entropy alloy // *Advanced Powder Technology*. 2018. Vol. 29. No. 9. P. 2221–2230. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.06.006>
- Ganesh U.L., Raghavendra H. Review on the transition from conventional to multi-component-based nano-high-entropy alloys-NHEAs // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Vol. 139. P. 207–216. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08360-z>
- Alshataif Y.A., Sivasankaran S., Al-Mufadi F.A., Alaboodi A.S., Ammar H.R. Manufacturing methods, microstructural and mechanical properties evolutions of high-entropy alloy: A review // *Metals and Materials International*. 2019. Vol. 26. P. 1099–1133. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00565-z>
- Cheng K.-C., Chen J.-H., Stadler S., Chen S.-H. Properties of atomized AlCoCrFeNi high-entropy alloy powders and their phase-adjustable coatings prepared via plasma spray process // *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 478. P. 478–486. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.203>
- Joseph J., Hodgson P., Jarvis T., Wu X., Stanford N., Fabijanic D.M. Effect of hot isostatic pressing on the microstructure and mechanical properties of additive manufactured Al<sub>x</sub>CoCrFeNi high entropy alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 733. P. 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.07.036>
- Jian R., Wang L., Zhou S., Zhu Y., Liang Y.-J., Wang B., Xue Y. Achieving fine-grain tungsten heavy alloys by selecting a high entropy alloy matrix with low W grain growth rate // *Materials Letters*. 2020. Vol. 278. Article 128405. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128405>
- Hou L., Hui J., Yao Y., Chen J., Liu J. Effects of Boron Content on microstructure and mechanical properties of AlFeCoNiB<sub>x</sub> high
- George E.P., Curtin W.A., Tسان C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms. *Acta Materialia*. 2020, vol. 188, pp. 435–474. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.015>
- Shivam V., Basu J., Pandey V.K., Shadangi Y., Mukhopadhyay N.K. Alloying behaviour, thermal stability and phase evolution in quinary AlCoCrFeNi high entropy alloy. *Advanced Powder Technology*. 2018, vol. 29, no. 9, pp. 2221–2230. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.06.006>
- Ganesh U.L., Raghavendra H. Review on the transition from conventional to multi-component-based nano-high-entropy alloys-NHEAs. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020, vol. 139, pp. 207–216. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08360-z>
- Alshataif Y.A., Sivasankaran S., Al-Mufadi F.A., Alaboodi A.S., Ammar H.R. Manufacturing methods, microstructural and mechanical properties evolutions of high-entropy alloy: A review. *Metals and Materials International*. 2019, vol. 26, pp. 1099–1133. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00565-z>
- Cheng K.-C., Chen J.-H., Stadler S., Chen S.-H. Properties of atomized AlCoCrFeNi high-entropy alloy powders and their phase-adjustable coatings prepared via plasma spray process. *Applied Surface Science*. 2019, vol. 478, pp. 478–486. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.203>
- Joseph J., Hodgson P., Jarvis T., Wu X., Stanford N., Fabijanic D.M. Effect of hot isostatic pressing on the microstructure and mechanical properties of additive manufactured Al<sub>x</sub>CoCrFeNi high entropy alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2018, vol. 733, pp. 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.07.036>
- Jian R., Wang L., Zhou S., Zhu Y., Liang Y.-J., Wang B., Xue Y. Achieving fine-grain tungsten heavy alloys by selecting a high entropy alloy matrix with low W grain growth rate. *Materials Letters*. 2020, vol. 278, article 128405. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128405>
- Hou L., Hui J., Yao Y., Chen J., Liu J. Effects of Boron Content on microstructure and mechanical properties of AlFeCoNiB<sub>x</sub> high

- entropy alloy prepared by vacuum arc melting // *Vacuum*. 2019. Vol. 164. P. 212–218. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.03.019>
9. Wu H., Huang S., Zhao C., Zhu H., Xie Z., Tu C., Li X. Microstructures and mechanical properties of in-situ FeCrNiCu high entropy alloy matrix composites reinforced with NbC particles // *Intermetallics*. 2020. Vol. 127. Article 106983. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106983>
  10. Xu Y., Li C., Huang Z., Chen Y., Zhu L. Microstructure evolution and mechanical properties of FeCoCrNiCuTi<sub>0.8</sub> high-entropy alloy prepared by directional solidification // *Entropy*. 2020. Vol. 22. No. 7. Article 786. <https://doi.org/10.3390/e22070786>
  11. Liu Y., Zhang Y., Zhang H., Wang N., Chen X., Zhang H., Li Y. Microstructure and mechanical properties of refractory HfMo<sub>0.5</sub>NbTiV<sub>0.5</sub>Si<sub>x</sub> high entropy composites // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 694. P. 869–876. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.014>
  12. Zhang Y., Han T., Xiao M., Shen Y. Effect of Nb content on microstructure and properties of laser cladding FeNiCoCrTi<sub>0.5</sub>Nb<sub>x</sub> high-entropy alloy coating // *Optik*. 2019. Vol. 198. Article 163316. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163316>
  13. Tabachnikova E.D., Shapovalov Yu.O., Smirnov S.N., Gorban V.F., Krapivka N.A., Firstov S.A. Low-temperature mechanical properties and thermally activated plasticity parameters of the CrMnFeCoNi<sub>2</sub>Cu high entropy alloy // *Low Temperature Physics*. 2020. Vol. 46. Article 958. <https://doi.org/10.1063/1.50001720>
  14. Надутов В.М., Волосевич П.Ю., Прошак А.В., Панарин В.Е., Свавильный Н.Е. Структура ионно-плазменных покрытий из высокоэнтропийного сплава AlFeNiCoCuCr // *Металлофизика и новейшие технологии*. 2017. Т. 39. № 11. С. 1525–1545.
  15. Ремпель А.А., Гельчинский Б.Р. Высокоэнтропийные сплавы: получение, свойства, практическое применение // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020. Т. 63. № 3-4. С. 248–253. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-3-4-248-253>
  16. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов // *Физика металлов и металловедение*. 2020. Т. 121. № 8. С. 807–841. <https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>
  17. Башев В.Ф., Кушнерев А.И. Структура и свойства литых и жидкозакаленных высокоэнтропийных сплавов системы Al–Cu–Fe–Ni–Si // *Физика металлов и металловедение*. 2017. Т. 118. № 1. С. 42–50. <https://doi.org/10.7868/S001532301610003X>
  18. Шайсултанов Д.Г., Степанов Н.Д., Салищев Г.А., Тихоновский М.А. Влияние термической обработки на структуру и твердость высокоэнтропийных сплавов CoCrFeNiMnV<sub>x</sub> (x = 0.25, 0.5, 0.75, 1) // *Физика металлов и металловедение*. 2017. Т. 118. № 6. С. 610–621. <https://doi.org/10.7868/S0015323017060080>
  19. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 122. P. 448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
  20. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys // *Science China Materials*. 2018. Vol. 61. No. 1. P. 2–22. <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
  21. 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>
  22. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and Properties of High-Entropy Alloys. Springer, Advanced Structured Materials, 2021. Vol. 107. 110 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8>
  23. Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Коновалов С.В., Шлярова Ю.А. Эволюция структуры AlCoCrFeNi высокоэнтропийного сплава при облучении импульсным электронным пучком // *Журнал технической физики*. 2021. Т. 91. № 12. С. 1971–1974. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.12.51762.205-21>
  24. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Shliarova Yu.A., Semin A.P. Prospects for the application of surface treatment of alloys by electron beams in state-of-the-art technologies // entropy alloy prepared by vacuum arc melting. *Vacuum*. 2019, vol. 164, pp. 212–218. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.03.019>
  9. Wu H., Huang S., Zhao C., Zhu H., Xie Z., Tu C., Li X. Microstructures and mechanical properties of in-situ FeCrNiCu high entropy alloy matrix composites reinforced with NbC particles. *Intermetallics*. 2020, vol. 127, article 106983. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106983>
  10. Xu Y., Li C., Huang Z., Chen Y., Zhu L. Microstructure evolution and mechanical properties of FeCoCrNiCuTi<sub>0.8</sub> high-entropy alloy prepared by directional solidification. *Entropy*. 2020, vol. 22, no. 7, article 786. <https://doi.org/10.3390/e22070786>
  11. Liu Y., Zhang Y., Zhang H., Wang N., Chen X., Zhang H., Li Y. Microstructure and mechanical properties of refractory HfMo<sub>0.5</sub>NbTiV<sub>0.5</sub>Si<sub>x</sub> high entropy composites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017, vol. 694, pp. 869–876. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.10.014>
  12. Zhang Y., Han T., Xiao M., Shen Y. Effect of Nb content on microstructure and properties of laser cladding FeNiCoCrTi<sub>0.5</sub>Nb<sub>x</sub> high-entropy alloy coating. *Optik*. 2019, vol. 198, article 163316. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.163316>
  13. Tabachnikova E.D., Shapovalov Yu.O., Smirnov S.N., Gorban V.F., Krapivka N.A., Firstov S.A. Low-temperature mechanical properties and thermally activated plasticity parameters of the CrMnFeCoNi<sub>2</sub>Cu high entropy alloy. *Low Temperature Physics*. 2020, vol. 46, article 958. <https://doi.org/10.1063/1.50001720>
  14. Nadutov V.M., Volosevich P.Yu., Proshak A.V., Panarin V.E., Svaivil'nyi N.E. Structure of ion-plasma coatings from AlFeNiCoCuCr high-entropy alloy. *Metallofizika i noveishie tekhnologii*. 2017, vol. 39, no. 11, pp. 1525–1545. (In Russ.).
  15. Rempel' A.A., Gel'chinskii B.R. High-entropy alloys: preparation, properties and practical application. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 3-4, pp. 248–253. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-3-4-248-253>
  16. Rogachev A.S. Structure, stability, and properties of high-entropy alloys. *Physics of Metals and Metallography*. 2020, vol. 121, no. 8, pp. 733–764. <https://doi.org/10.1134/S0031918X20080098>
  17. Bashev V.F., Kushnerev A.I. Structure and properties of cast and splat-quenched high-entropy Al–Cu–Fe–Ni–Si alloys. *Physics of Metals and Metallography*. 2017, vol. 118, no. 1, pp. 39–47. <https://doi.org/10.1134/S0031918X16100033>
  18. Shaysultanov D.G., Stepanov N.D., Salishchev G.A., Tikhonovskii M.A. Effect of heat treatment on the structure and hardness of high-entropy alloys CoCrFeNiMnV<sub>x</sub> (x = 0.25, 0.5, 0.75, 1). *Physics of Metals and Metallography*. 2017, vol. 118, no. 6, pp. 579–590. <https://doi.org/10.1134/S0031918X17060084>
  19. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. 2017, vol. 122, pp. 448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
  20. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*. 2018, vol. 61, no. 1, pp. 2–22. <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
  21. 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>
  22. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and Properties of High-Entropy Alloys. Springer, Advanced Structured Materials, 2021, vol. 107, 110 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8>
  23. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Konovalov S.V., Shlyarova Yu.A. Evolution of the structure of AlCoCrFeNi high-entropy alloy irradiated by a pulsed electron beam. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2021, vol. 91, no. 12, pp. 1971–1974. (In Russ.). <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.12.51762.205-21>
  24. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Zagulyaev D.V., Konovalov S.V., Shliarova Yu.A., Semin A.P. Prospects for the application of surface treatment of alloys by electron beams in state-of-the-art technologies //

- Progress in Physics of Metals. 2020. Vol. 21. No. 3. P. 345–362. <https://doi.org/10.15407/ufm.21.03.345>
25. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorobiev S.E., Kononov S.V. *Fatigue of Steels Modified by High Intensity Electron Beams*. Cambridge CISP Ltd, 2015. 272 p.
  26. ГОСТ 1497 – 84. *Металлы. Методы испытаний на растяжение*. М.: Стандартинформ, 2005. 24 с.
  27. Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф. Наноструктурирование поверхности металлокерамических и керамических материалов при импульсной электронно-пучковой обработке // *Известия вузов. Физика*. 2008. № 5. С. 60–70.
25. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Vorobiev S.E., Kononov S.V. *Fatigue of Steels Modified by High Intensity Electron Beams*. Cambridge CISP Ltd, 2015, 272 p.
  26. *GOST 1497 – 84. Metals. Tensile test methods*. Moscow: Standartinform, 2005, 24 p. (In Russ.).
  27. Koval' N.N., Ivanov Yu.F. Nanostructuring of the surface of cermet and ceramic materials during pulsed electron-beam processing. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2008, no. 5, pp. 60–70. (In Russ.).

**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

**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

**Юрий Федорович Иванов**, д.ф.-м.н., профессор, Сибирский государственный индустриальный университет; главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН  
**ORCID:** 0000-0003-0271-5504  
**E-mail:** yufi55@mail.ru

**Yurii F. Ivanov**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Siberian State Industrial University; Chief Researcher, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
**ORCID:** 0000-0003-0271-5504  
**E-mail:** yufi55@mail.ru

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

**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

**Ирина Алексеевна Панченко**, к.т.н., заведующая лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0002-1631-9644  
**E-mail:** i.r.i.ss@yandex.ru

**Irina A. Panchenko**, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0002-1631-9644  
**E-mail:** i.r.i.ss@yandex.ru

**ВКЛАД АВТОРОВ**

**CONTRIBUTION OF THE AUTHORS**

**V. E. Gromov** – анализ фрактографии поверхности разрушения и механических свойств высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi после электронно-пучковой обработки.  
**Ю. Ф. Иванов** – электронно-микроскопические исследования поверхности разрушения ВЭС.  
**К. А. Осинцев** – изготовление высокоэнтропийного сплава и образцов для исследования, снятие деформационных кривых и анализ механических свойств.  
**С. В. Воробьев** – анализ публикаций по применению ВЭС.  
**И. А. Панченко** – количественная оценка результатов фрактографии поверхности разрушения высокоэнтропийного сплава CrMnFeCoNi после электронно-пучковой обработки, написание варианта статьи.

**V. E. Gromov** – analysis of fractography of the fracture surface and mechanical properties of CrMnFeCoNi high-entropy alloy after electron-beam processing.  
**Yu. F. Ivanov** – electron microscopic studies of the destruction surface of wind turbines.  
**K. A. Osintsev** – production of a high-entropy alloy and samples for the research, design of deformation curves and analysis of mechanical properties.  
**S. V. Vorob'ev** – analysis of publications on the use of wind turbines.  
**I. A. Panchenko** – quantitative evaluation of the results of fractography of the fracture surface of CrMnFeCoNi high-entropy alloy after electron-beam processing, writing the text.

Поступила в редакцию 20.12.2021  
 После доработки 14.01.2022  
 Принята к публикации 19.01.2022

Received 20.12.2021  
 Revised 14.01.2022  
 Accepted 19.01.2022



Краткое сообщение

УДК 621.891:621

DOI 10.17073/0368-0797-2022-6-434-436

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2326>



## АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО РЕСУРСА ПРИВОДА ВОЛОЧИЛЬНОГО СТАНА

А. Г. Никитин<sup>1</sup>, И. А. Баженов<sup>2</sup>, С. П. Герасимов<sup>3</sup>

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

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

<sup>3</sup> АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (Россия, 654043, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ш. Космическое, 16)

**Аннотация.** Для предприятий металлургической промышленности актуальной является задача повышения эксплуатационного ресурса волочильных станов. Причины существенного снижения ресурса и увеличения количества простоев оборудования связаны с эксплуатационными проблемами. Простои из-за аварийных отказов оборудования составляют до 45 % времени работы стана в месяц. В работе рассмотрена схема привода волочильного стана и проведен анализ потерь времени на восстановление его работоспособного состояния. Показано, что замена цилиндрического редуктора с механизмом переключения скоростей и конической передачей на планетарный мотор-редуктор, оборудованный частотным преобразователем, позволяет увеличить производительность волочильного стана за счет уменьшения аварийных простоев оборудования.

**Ключевые слова:** волочильный стан, привод, повышение производительности, снижение затрат, надежность, планетарный редуктор, частотный преобразователь

**Для цитирования:** Никитин А.Г., Баженов И.А., Герасимов С.П. Анализ эксплуатационного ресурса привода волочильного стана // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 6. С. 434–436. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-434-436>

Short report

## ANALYSIS OF THE DRAWING MILL DRIVE OPERATION

A. G. Nikitin<sup>1</sup>, I. A. Bazhenov<sup>2</sup>, S. P. Gerasimov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, 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> JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant” (16 Kosmicheskoe Route, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654043, Russian Federation)

**Abstract.** For enterprises of the metallurgical industry, the task of increasing the operational life of drawing mills is urgent. The reasons for a significant decrease in the resource and an increase in the number of equipment downtime are related to the operational problems. Downtime due to emergency equipment failures account for up to 45 % of the mill’s operating time per month. The paper considers the drive scheme of the drawing mill and analyzes the loss of time to restore its working condition. It is shown that the replacement of a cylindrical gearbox with a gearshift mechanism and a bevel gear with a planetary gear motor equipped with a frequency converter will increase the productivity of the drawing mill by reducing emergency equipment downtime.

**Keywords:** drawing mill, drive, productivity improvement, cost reduction, reliability, planetary gearbox, frequency converter

**For citation:** Nikitin A.G., Bazhenov I.A., Gerasimov S.P. Analysis of the drawing mill drive operation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 6, pp. 434–436. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-434-436>

Волоочильный стан, применяемый для обработки металлов волочением, состоит из двух основных элементов: волоки и тянущего устройства, сообщающего обрабатываемому металлу движение через волоку, а вращение от электродвигателя к тянущему устройству передается через редуктор [1, 2].

Для получения качественной готовой продукции выполнение технологической операции волочения осуществлять необходимо на исправном оборудовании, однако с течением времени оборудование физически устаревает, его узлы приходят в негодность, что требует постоянного ремонта или частичной замены [3, 4].

Актуальная задача повышения эксплуатационного ресурса волоочильных станков является комплексной проблемой. Для решения требуется подход, в котором учитываются характеристики конструкции стана, параметры, определяющие условия эксплуатации стана, а также параметры технологического процесса производства проволоки.

С целью определения надежности была проанализирована работа стана АЗТМ ВН 2-550 (см. рисунок).

Привод стана состоит из электродвигателя 1, крутящий момент которого через муфту 2, ременные передачи 3 и 4, цилиндрический редуктор с механизмом переключения скоростей 5, конические передачи 6 и 8 передается на вертикальный размоточный барабан 9 (условно показан в горизонтальном исполнении), опирающийся на упорный подшипник 7. Установка редуктора с механизмом переключения скоростей обусловлена необходимостью обеспечивать плавный пуск механизма вращения барабана при подаче исходного материала в волоку на малых скоростях с постепенным увеличением скорости для повышения производительности стана.

Опыт эксплуатации данного стана сталепрокатного цеха АО «ЕВРАЗ ЗСМК» показал, что его простои из-за аварийных отказов оборудования составляют до 45 % времени работы стана в месяц, т. е. более 400 т потеря готовой продукции, что в пересчете эквивалентно 16 млн рублей в ценах 2021 года.

Анализ причин простоев из-за аварийных отказов элементов оборудования 41 волоочильного стана цеха за квартал показал, что наибольшие потери времени на восстановление работоспособного состояния стана приходятся на ремонт цилиндрического редуктора с механизмом переключения скоростей, восстановление конических шестерен, а также на замену приводных ремней. При этом время на восстановление стана занимает от 7 до 35 дней.

Для анализа основных причин, вызывающих поломки, и, как следствие, простои стана, были разработаны специальные формы, в которые включены основные категории причин появления отказов (или точнее узлы, вышедшие из строя). При регулярном наблюдении для каждой категории фиксировались продолжительность устранения простоя и стоимость его устранения, поскольку затраты на устранение отказа

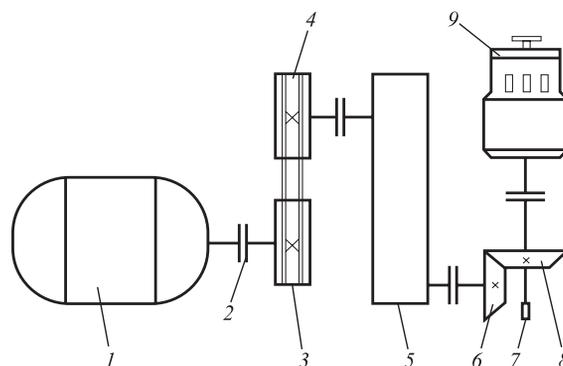


Схема привода волоочильного стана с вертикальным расположением размоточного барабана

Scheme of the drawing mill drive with vertical arrangement of the unwinding drum

и его продолжительность не связаны строгой математической зависимостью. На основе собранных данных были построены диаграммы Парето по следующим количественным данным: количество отказов, продолжительность устранения, стоимость устранения по каждой категории. Таким образом, причины отказов были ранжированы по значимости, что позволило системно подойти к изменению конструкции стана.

С целью уменьшения времени простоев конструкции привода стана АЗТМ ВН 2-550 изменили. Из привода волоочильного стана исключили часто выходящие из строя узлы: две конических шестерни, цилиндрический редуктор с механизмом переключения скоростей и ременную передачу. Вместо них установили трехсателлитный планетарный мотор-редуктор МПО-1М-10-5,74-7,5/250 (передаточное отношение 5,74) вертикального исполнения, оборудованный частотным преобразователем.

В результате такой модернизации уменьшилась масса привода с планетарным редуктором, а так как редуктор имеет вертикальное расположение и устанавливается на вал размоточного барабана, вокруг стана появляется дополнительное свободное место. При этом в планетарном редукторе действуют малые осевые нагрузки, имеется значительно меньшее количество узлов и звеньев, что увеличивает срок службы по сравнению с многоступенчатым редуктором с механизмом переключения скоростей [5]. Использование частотного преобразователя позволяет при необходимости изменять частоту вращения привода без остановки работы стана (без механического переключения).

Кроме сокращения потерь, связанных с недополучением готовой продукции, для обоснования эффективности предложенных конструктивных изменений могут быть использованы денежные показатели. Это, во-первых, сокращение затрат на восстановительные работы, которые устанавливаются по усредненной стоимости ремонтных работ; во-вторых, экономия, вызванная сокращением непроизводительных маши-

но-часов. Стоимость машино-часа определяется как величина годовых амортизационных отчислений, деленная на годовой фонд работы оборудования, но без учета доли непроизводительных простоев в общем годовом фонде [6]. Таким образом можно оценить повышение производительности, связанное с ростом эффективности эксплуатации технологического оборудования.

## Выводы

Проведенная модернизация конструкции привода волочильного стана позволяет увеличить его производительность до расчетного значения 805 т проволоки в месяц за счет уменьшения аварийных простоев оборудования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Радионова Л.В., Радионов А.А. Современное состояние и перспективы развития волочильного производства стальной проволоки // *Машиностроение*. 2013. Т. 1. № 1. С. 3–11.
2. Vega G., Haddi A., Imad A. Investigation of process parameters effect on the copper-wire drawing // *Materials and Design*. 2009. Vol. 30. No. 8. P. 3308–3312.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.12.006>
3. Haddi A., Imad A., Vega G. Analysis of temperature and speed effects on the drawing stress for improving the wire drawing process // *Materials and Design*. 2011. Vol. 32. No. 8-9. P. 4310–4315.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.010>
4. Железняк Л.М., Савиных В.В., Василевский П.А. Применение прокатно-волочильного стана в производстве изделий для электромашиностроения // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2018. Т. 16. № 8. С. 366–369.
5. Lai T.-S. Design and machining of the epicycloid planet gear of cycloid drives // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006. Vol. 28. No. 7-8. P. 665–670.  
<https://doi.org/10.1007/S00170-004-2423-X>
6. Дронов А.И., Паршин В.С., Семенова Н.В. Оценка эффективности инноваций работы волочильных станов // *Вестник машиностроения*. 2021. № 6. С. 82–85.  
<https://doi.org/10.36652/0042-4633-2021-6-82-85>

1. Radionova L.V., Radionov A.A. Current state and perspectives of development of wire-drawing steel wire. *Mashinostroenie*. 2013, vol. 1, no. 1, pp. 3–11. (In Russ.).
2. Vega G., Haddi A., Imad A. Investigation of process parameters effect on the copper-wire drawing. *Materials and Design*. 2009, vol. 30, no. 8, pp. 3308–3312.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.12.006>
3. Haddi A., Imad A., Vega G. Analysis of temperature and speed effects on the drawing stress for improving the wire drawing process. *Materials and Design*. 2011, vol. 32, no. 8-9, pp. 4310–4315.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.04.010>
4. Zheleznyak L.M., Savinykh V.V., Vasilevskii P.A. Use of rolling and drawing mill in manufacture of products for electrical engineering. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2018, vol. 16, no. 8, pp. 366–369. (In Russ.).
5. Lai T.-S. Design and machining of the epicycloid planet gear of cycloid drives. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006, vol. 28, no. 7-8, pp. 665–670.  
<https://doi.org/10.1007/S00170-004-2423-X>
6. Dronov A.I., Parshin V.S., Semenova N.V. Evaluation of the effectiveness of innovations in drawing mills operation. *Vestnik mashinostroeniya*. 2021, no. 6, pp. 82–85. (In Russ.).  
<https://doi.org/10.36652/0042-4633-2021-6-82-85>

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Александр Григорьевич Никитин**, д.т.н., профессор кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0001-9198-6386  
**E-mail:** nikitin1601@yandex.ru

**Aleksandr G. Nikitin**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Mechanics and Machine Engineering, Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0001-9198-6386  
**E-mail:** nikitin1601@yandex.ru

**Игорь Алексеевич Баженов**, к.т.н., доцент кафедры маркетинга, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина  
**ORCID:** 0000-0002-0099-483X  
**E-mail:** mta@kpost.ru

**Igor' A. Bazhenov**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Marketing, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin  
**ORCID:** 0000-0002-0099-483X  
**E-mail:** mta@kpost.ru

**Семен Павлович Герасимов**, старший мастер по ремонту оборудования, АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»  
**ORCID:** 0000-0001-5012-2565  
**E-mail:** semyon05@bk.ru

**Semen P. Gerasimov**, Senior Technician on Equipment Repair, JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant”  
**ORCID:** 0000-0001-5012-2565  
**E-mail:** semyon05@bk.ru

Поступила в редакцию 09.03.2022  
 После доработки 24.03.2022  
 Принята к публикации 22.04.2022

Received 09.03.2022  
 Revised 24.03.2022  
 Accepted 22.04.2022

*Оригинальная статья*

УДК 681.5.017

DOI 10.17073/0368-0797-2022-6-437-446

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2327>

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ АГРЕГАТАМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ПРЕЦЕДЕНТОВ

С. М. Кулаков, Р. С. Койнов, М. В. Ляховец, Е. Н. Тараборина

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

**Аннотация.** Рассмотрена актуальная задача человеко-машинного управления сложными технологическими агрегатами и комплексами, которые характеризуются большим разнообразием состояний, многомерностью, изменчивостью, неопределенностью. К числу таких агрегатов в черной металлургии относятся коксовые батареи, доменные печи, сталеплавильные агрегаты (дуговые печи, кислородные конвертеры), литейно-прокатные комплексы, прокатные станы, основные цехи и производства. Показана недостаточная для XXI-го в. эффективность модельного подхода к созданию систем управления такими объектами. Рассмотрены альтернативные подходы, основанные на концепции лучших практик. В частности, к ним относятся натурно-модельный и натурный подходы к разработке систем поддержки и принятия управляющих решений. Представлены известные натурно-модельные процедуры применения лучших практик (методы типопредставительных ситуаций и образцовых технологических циклов). Для систем управления технологическими процессами предложен новый (прецедентный) метод автоматизированного выбора и реализации управляющих воздействий с участием операторов-технологов. Разработан модифицированный прецедентный цикл (CBR-цикл) выбора управлений и соответствующая функциональная схема системы программного управления технологическим агрегатом циклического действия. Усовершенствованный прецедентный CBR-цикл включает следующие дополнительные операции: коррекция управляющих решений для отобранных прецедентов; ретроспективная оптимизация реализованных управляющих решений; сохранение не только лучших и оптимизированных, но и ошибочных решений; актуализация базы прецедентов; формирование решений в уникальных или ранее не зафиксированных ситуациях. Сформирована структура информационной модели прецедента на примере программного управления плавкой стали в условиях кислородно-конвертерного цеха, включающая данные о конкретной ситуации в системе управления, параметры выбранных управляющих воздействий и полученные результаты плавки стали. Разработан пример формирования программы управления процессом подготовки и выполнения предстоящей плавкой стали на основе данных предварительно выбранной плавки-прецедента в условиях современного кислородно-конвертерного цеха.

**Ключевые слова:** автоматизированное управление, сложные технологические объекты, модельный подход, натурно-модельный подход, метод прецедентов, CBR-цикл принятия решений, информационная модель прецедента, плавка, программа управления, коррекция

**Для цитирования:** Кулаков С.М., Койнов Р.С., Ляховец М.В., Тараборина Е.Н. Автоматизированное управление сложными металлургическими агрегатами на основе метода прецедентов // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 6. С. 437–446.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-437-446>

*Original article*

## AUTOMATED CONTROL OF COMPLEX METALLURGICAL UNITS BASED ON THE CBR METHOD

S. M. Kulakov, R. S. Koinov, M. V. Lyakhovets, E. N. Taraborina

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

**Abstract.** The paper considers the actual problem of human-machine control of complex technological units and complexes, which are characterized by a large variety of states, multidimensionality, variability, and uncertainty. Such units in the ferrous metallurgy include coke batteries, blast furnaces, steelmaking units (arc furnaces, oxygen converters), foundry and rolling complexes, rolling mills, main workshops and production facilities. The effectiveness of the model approach to the creation of control systems for such objects is shown to be insufficient for the XXI century. Alternative approaches based on the concept of best reasoning (CBR) are considered. In particular, they include full-scale model and full-scale approaches to the development of support systems and management decision-making. The well-known full-scale model procedures for applying the best reasoning (methods of typical situations and exemplary technological cycles) are presented. The authors propose a new CBR method of automated selection and implementation of control actions with the participation of process operators for process control systems. A modified CBR-cycle of control selection and the corresponding functional scheme of the software control system for a cyclic technological unit were developed. The improved CBR-cycle includes the following additional operations: correction of control decisions for selected cases; retrospective optimization of implemented control

decisions; preservation of not only the best and optimized, but also erroneous decisions; updating of the case base; formation of solutions in unique or previously unreported situations. The structure of the case information model is formed on the example of software control of steel melting in the conditions of an oxygen converter shop. It includes three sections: data on the specific situation in the control system, parameters of the selected control actions, and results of steel melting. An example of the control program formation for the preparation and execution of the upcoming steel melting is based on the data of a pre-selected melting case in the conditions of a modern oxygen converter process.

**Keywords:** automated control, complex technological objects, model approach, full-scale model approach, CBR method, CBR-based decision-making cycle, CBR information model, steel melting in oxygen converter, control program for upcoming melting, correction of CBR control decisions

**For citation:** Kulakov S.M., Koinov R.S., Lyakhovets M.V., Taraborina E.N. Automated control of complex metallurgical units based on the CBR method. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 6, pp. 437–446. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-6-437-446>

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема автоматизированного управления сложными металлургическими агрегатами (СМА) (электро-сталеплавильные печи, кислородные конвертеры, агрегаты «печь-ковш», коксовые батареи, доменные печи, ферросплавные печи, литейно-прокатные комплексы и другие технологические объекты) не может быть признана эффективно решенной в рамках традиционного (модельного) подхода. Сложность, нестационарность и большое разнообразие состояний СМА, в сочетании с недостаточной точностью математических моделей каналов управления и влияния контролируемых возмущений побуждают искать другие подходы к принятию управляющих решений. В частности, целесообразно обратиться к модификации и алгоритмизации широко известной концепции «лучших практик» применительно к практикам управления СМА. В настоящей работе выполнен краткий анализ традиционного (модельного) подхода к построению автоматизированных управляющих систем и более подробно представлен подход к алгоритмизации накопления и ситуационного применения опыта управления СМА, основанный на методе прецедентов.

## МОДЕЛЬНЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Отличительной особенностью классического метода синтеза алгоритма управления с обратной связью является использование математической модели управляющих каналов объекта, а также модели влияния приведенного неконтролируемого возмущения. В простом случае структура алгоритма выбирается из числа типовых (П – пропорциональный, ПИ – пропорционально-интегральный, ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальный и др.), а его настройки определяются на основе эмпирических формул или посредством решения задачи оптимизации по критерию минимальной дисперсии ошибок регулирования [1].

Более сложными по сравнению с вышеназванными алгоритмами автоматического управления (САУ) являются так называемые системы APC (*Advanced Process Control*), то есть системы усовершенствованного управ-

ления многомерными технологическими объектами, главным компонентом которых является прогнозирующая модель объекта и алгоритмы прогнозирующего управления (*Model Predictive Control – MPC*) [2, 3]. Они нашли широкое применение на нефтеперерабатывающих, химических, целлюлозно-бумажных и других предприятиях мира. Схема системы управления с прогнозирующей моделью показана на рис. 1 ( $U^A, Y^A, W_k^A, W_{нк}^A$  и  $S^A$  – действительные управляющие, выходные, контролируемые, неконтролируемые возмущающие воздействия (возмущения) объекта управления и его состояния;  $U^H, Y^H, W_k^H$  и  $S^H$  – натурные сигналы управления, выходные сигналы объекта, сигналы контролируемых возмущений и состояний объекта;  $U^M$  и  $Y^M$  – модельные сигналы управления и выходные сигналы объекта;  $Y^*$  и  $O^*$  – заданные значения выходных воздействий объекта и ограничений на управления;  $Q$  и  $O$  – целевые функции и ограничения оптимизатора;  $E = (Y^H - Y^M)$  – вектор ошибок прогнозирования).

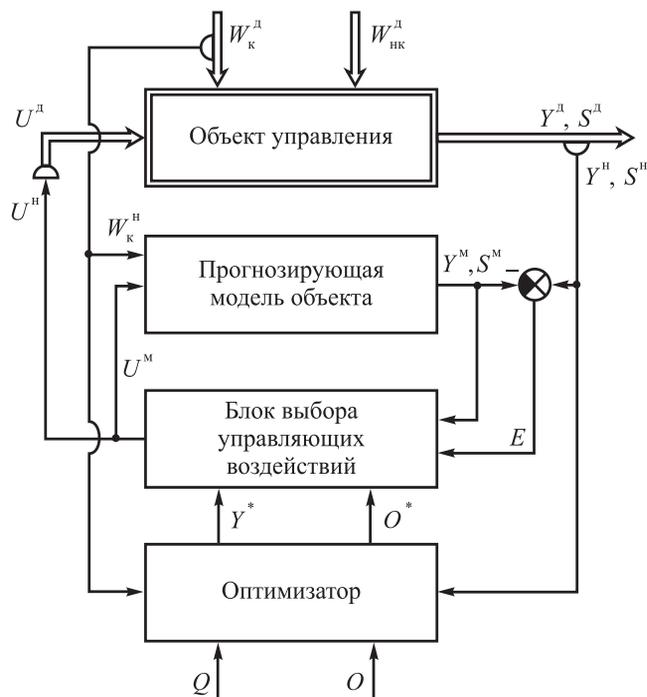


Рис. 1. Общая схема системы управления технологическим объектом с прогнозирующей моделью

Fig. 1. General scheme of control system of technological object with a predictive model

По отношению к ПИД-регуляторам MPC дают на указанных предприятиях эффект 0,5 – 5,0 млн долларов на одну установку в год [3]. Алгоритм выбора управляющих воздействий использует численную оптимизацию для отыскания управлений  $U^H$  на горизонте управления с использованием прогнозов  $Y^M$  на интервале динамической памяти объекта.

Рассмотренные эффективные для своего класса объектов структуры систем автоматизированного управления технологическими объектами характеризуются неявным [1] или явным [2 – 4] использованием функциональной или физико-химической моделей объекта управления, которая сохраняет адекватность длительное время или может быть своевременно обновлена (при существенном изменении свойств объекта) с помощью встроенной в управляющую систему подсистемы идентификации. Такие системы малоэффективны для сложных плохо формализуемых технологических объектов с изменяющимися свойствами, в том числе для вышеперечисленных металлургических агрегатов и производственных комплексов. Для них целесообразно создавать системы управления, основанные не на модельном, а на натурно-модельном и (или) натурном подходах к управлению [5].

#### **ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАТУРНО-МОДЕЛЬНОГО ПОДХОДА К СИНТЕЗУ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СМА**

В работах [6, 7] предложено осуществлять накопление и использование опыта прогнозирования и принятия решений в системах управления в виде множества типопредставительных ситуаций (ТПС). При этом под ТПС понимается взаимосвязанная совокупность структуры, информационного отображения объекта, внешних и внутренних условий его функционирования, параметров каналов управления и контролируемых внешних воздействий, реализаций приведенных возмущающих воздействий, критериев эффективности управления. Конечное множество ТПС рассматривается в качестве натурно-модельного блока, на основе которого принимаются управляющие решения и (или) прогнозы. В системе прогнозирующего управления коксохимическим производством металлургического комбината используется более 50 ТПС [7].

Применение метода ТПС подробно представлено в работе [7], которая является наглядным примером управления сложным производственным комплексом.

Еще одним примером использования натурно-модельного подхода является применение метода управления по образцовым циклам, а именно – управление плавкой стали в кислородном конвертере [8, 9]. Все плавки стали разделены на классы в зависимости от значений их входных и выходных переменных. Классификация плавки стали предполагает использование следующих параметров: содержание кремния, марганца, фосфора, серы в жидком чугуна; температура

и масса жидкого чугуна; содержание углерода, фосфора, серы в стали; температура стали; основность шлака; минутный расход дутья; положение продувочной фурмы. Диапазон значений каждой из названных переменных разбит на несколько (до пяти) поддиапазонов. Такому разбиению соответствует не более 65-ти классов, для каждого из которых выбрана образцовая плавка. Если входные и заданные выходные значения переменных предстоящей плавки совпадают с одним из классов и соответствующей образцовой плавкой, информация о параметрах которой хранится в базе данных, то значения управляющих воздействий для предстоящей плавки принимаются такими же, как в образцовой плавке.

Рассматриваемый метод в своей основе аналогичен методу принятия управленческих решений по типопредставительным ситуациям, но в нем не предполагается оперативная корректировка управлений с применением пересчетной модели (модели объекта «в малом»), и является примером натурального подхода к управлению СМА, к числу которых относится процесс выплавки стали в конвертере.

#### **ПРЕЦЕДЕНТНЫЙ МЕТОД НАКОПЛЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПЫТА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ СМА**

Суть метода принятия решений на основе прецедентов широко известна и наглядно отображается так называемым CBR-циклом принятия решений [10 – 17]. Вместе с тем алгоритмические основы прецедентного подхода к принятию управленческих решений в автоматизированных (человеко-машинных) системах управления технологическими процессами находятся пока еще на начальном этапе своего развития [5, 18 – 20].

Прежде всего необходимо модифицировать CBR-цикл принятия решений, рассматривая его как цикл выработки управляющих воздействий на основе информации о текущей ситуации в системе управления (о внешних воздействиях, параметрах состояния агрегата, выходных воздействиях, прошлых и текущих управлениях, цели управления и ограничениях). На рис. 2 показан такой модифицированный цикл выработки управляющих воздействий на основе прецедентов, включающий действия лица, принимающего решения (ЛПР) (оператора-технолога, мастера, начальника смены, диспетчера).

Актуальными задачами, связанными с реализацией модифицированного CBR-цикла применительно к СМА, являются разработка функциональной схемы системы управления СМА; построение информационной модели прецедента; выбор наилучшего (оптимального) прецедента из множества актуальных. На примере разработки программы управления предстоящей плавкой стали в кислородном конвертере, включающей

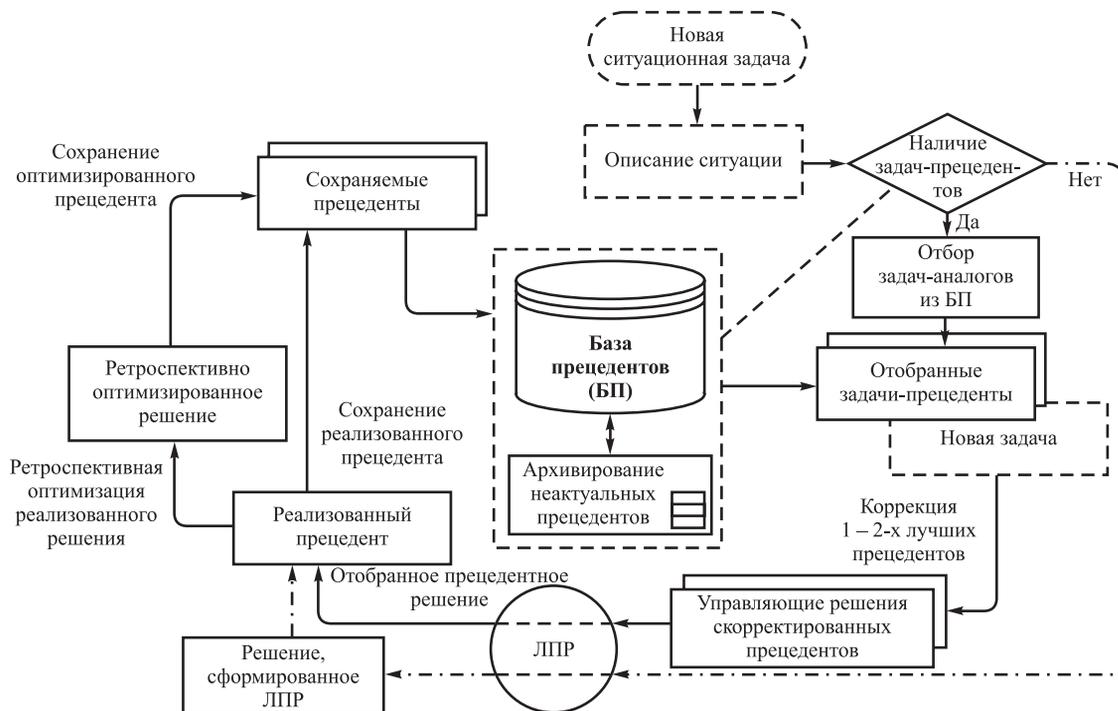


Рис. 2. Модифицированный цикл выработки и реализации управляющих решений применительно к системе управления СМА

Fig. 2. Modified cycle of development and implementation of control solutions in relation to CMU control system

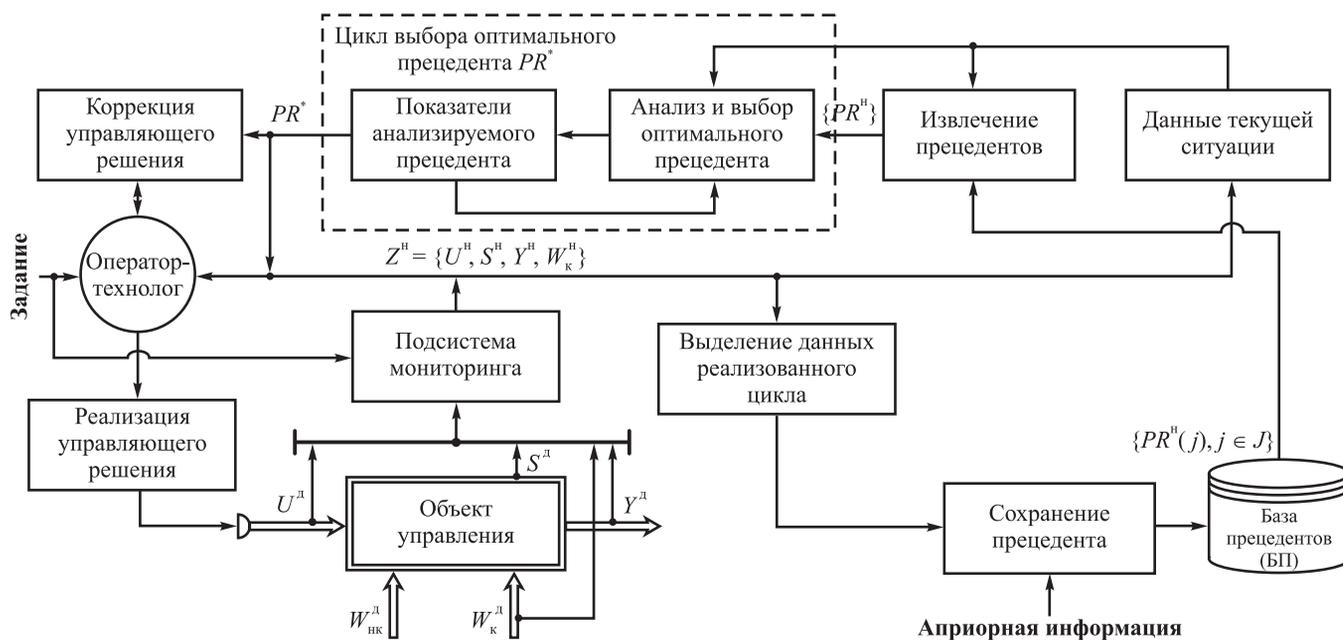


Рис. 3. Схема системы прецедентного управления СМА циклического действия

Fig. 3. Scheme of CBR-based control system of cyclic CMU

количество и моменты подачи шихтовых материалов, расхода дутья и положение продувочной фурмы, массу и ритм подачи шлакообразующих, температуру расплава, разработаны общая схема системы управления (рис. 3,  $\{PR^H\}$  – извлеченные натурные прецеденты;  $Z^H = \{U^H, S^H, Y^H, W_k^H\}$  – вектор натуральных данных;  $PR^*$  и  $\{PR^H(j), j \in J\}$  – оптимальный прецедент и множест-

во натуральных прецедентов, данные которых сохранены в БП) и структура информационной модели прецедента (рис. 4).

В таблице представлен пример применения метода прецедентов для определения параметров программы управления предстоящей плавкой стали в кислородном конвертере.

Приведены данные плавки-прецедента, которая по времени выполнения отстоит от предстоящей плавки менее чем на сутки и совпадает с ней по заданной марке стали. В таблице показаны фактические данные о химическом составе чугуна, длительности межплавочного простоя предстоящей плавки, а также планируемые (на базе прецедента) параметры. Для сравнения приведены фактические значения параметров шихтовки и ведения плавки технологами цеха, которые не имели возможности учитывать рекомендуемую программу управления рассматриваемой плавкой. Вследствие последнего фактически реализованная программа ведения плавки имеет следующие недостатки:

- плавка проведена с додувкой продолжительностью 1 мин 44 с;
- температура металла по окончании плавки (1536 °C) существенно ниже нормы (не менее 1600 °C);
- основность (2,3) шлака существенно ниже нормы (2,5).

При формировании программы на основе плавки-прецедента некоторые параметры прецедента были скорректированы с учетом исключения додувки (длительностью 1 мин 7 с) и компенсации значительного межплавочного простоя (продолжительностью 26 мин 56 с). Измененные значения параметров отмечены звездочкой.

Длительность продувки  $T_{\text{пд}}$  и расход кислорода  $V(\text{O}_2)_{\text{пд}}$  на продувку корректировали с учетом продолжительности додувки  $T_{\text{дд}}$  и расхода кислорода  $V(\text{O}_2)_{\text{дд}}$  на додувку:

$$T_{\text{пд}}^* = T_{\text{пд}} + T_{\text{дд}}; \tag{1}$$

$$V^*(\text{O}_2) = V(\text{O}_2)_{\text{пд}} + V(\text{O}_2)_{\text{дд}}.$$

Расход угля  $G_{\text{у}}$  и кислорода  $V(\text{O}_2)_{\text{пр}}$  на подогрев металлелома (для компенсации межплавочного простоя  $t_{\text{мп}}$  конвертера) корректировались следующим образом:

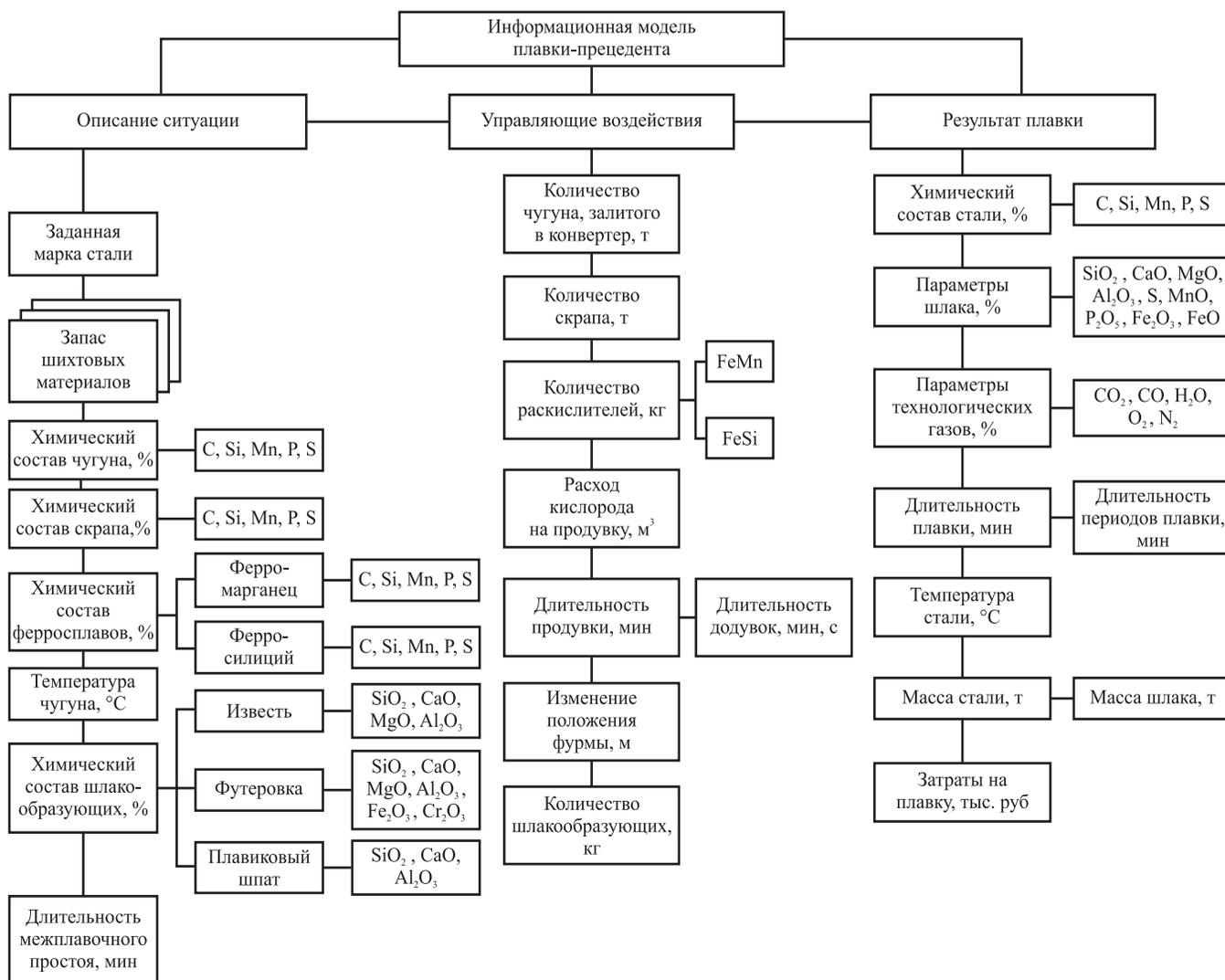


Рис. 4. Основные компоненты информационной модели прецедента (для выбора программы управления предстоящей плавкой стали в конвертере)

Fig. 4. The main components of CBR information model (for choosing a control program for upcoming steel melting in a converter)

**Пример определения параметров программы шихтовки и ведения плавки стали  
в кислородном конвертере**

**Example of determining the parameters of charging program and conducting steel melting  
in an oxygen converter**

Параметры плавки стали	Плавка-прецедент	Данные предстоящей плавки стали
Номер плавки	...568	...584
Дата плавки	15.09.18	16.09.18
Межплавочный простой [ч:мин:с]	0:09:59	0:26:56
Параметры жидкого чугуна		
Масса чугуна, т	255,1	<u>255,0</u> 256,4
Температура, °С	1338	1377
Si, %	0,28	0,45
Mn, %	0,38	0,41
S, %	0,055	0,02
P, %	0,07	0,069
Параметры лома		
Масса лома, т	93	<u>93,0</u> 94,8
Количество совков	2	<u>2</u> 2
Масса лома первого сорта, т	42,4	<u>42,4</u> 57,0
Масса лома второго сорта, т	50,6	<u>50,6</u> 37,0
Длительность нагрева [ч:мин:с]	00:06:51	<u>10:37*</u> 06:17
Расход кислорода на нагрев, м <sup>3</sup>	2386	<u>3702*</u> 2200
Расход угля, т	3,08	<u>4,80*</u> 3,08
Длительность продувки [ч:мин:с]	00:20:15*	<u>20:15</u> 18:18
Длительность додувки [ч:мин:с]	00:00*	<u>00:00</u> 01:44
Расход на продувку, м <sup>3</sup>	17265	<u>17 265</u> 17 443
Расход извести, т	11,52	<u>11,52</u> 14,11
Расход известняка, т	0,53	<u>0,53</u> 0
Расход флюса, т	4,07	<u>4,07</u> 4,11
Расход флюса ФМ, т	0,99	<u>0,99</u> 0,99
		Данные на повалке
Основность шлака	2,51	<u>2,51</u> 2,30
Расход кислорода на плавку, м <sup>3</sup>	19651	<u>19 651</u> 19 643

Т а б л и ц а (продолжение)

Параметры плавки стали	Плавка-прецедент	Данные предстоящей плавки стали
Содержание Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	1,79	<u>1,79</u> 2,58
Содержание С, %	0,039	<u>0,039</u> 0,048
Содержание CaO, %	26,4	<u>26,4</u> 26,0
Содержание MgO, %	11,3	<u>11,3</u> 8,2
Содержание FeO, %	43,1	<u>43,1</u> 42,6
Содержание Р, %	0,006	<u>0,006</u> 0,004
Содержание Mn, %	0,064	<u>0,064</u> 0,045
Содержание MnO, %	4,62	<u>4,62</u> 4,68
Содержание P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	1,08	<u>1,08</u> 0,99
Содержание S, %	0,043	<u>0,043</u> 0,034
Содержание SiO <sub>2</sub> , %	10,5	<u>10,5</u> 11,3
Содержание TiO <sub>2</sub> , %	0,56	<u>0,56</u> 0,90
Содержание V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , %	0,86	<u>0,86</u> 1,12
Температура, °С	1627	<u>1627</u> 1586
Длительность плавки, мин:с	46:38	<u>49:24*</u> 46:38

Пр и м е ч а н и е. Номер конвертера – 4; использовали сталь марки СтЗпс/э; код способа разливки стали – 0; в числителе третьего столбца указаны значения параметров, соответствующие программе ведения плавки, в знаменателе – фактические значения.

$$G_Y^* = \begin{cases} \left[ G_Y \frac{\tau_{мп}^{пр}}{\tau_{мп}} \right], & \text{если } [\cdot] \leq G_Y^{\max}; \\ G_Y^{\max}, & \text{если } [\cdot] > G_Y^{\max}; \end{cases} \quad (2)$$

$$V^*(O_2)_{пд} = V(O_2)_{пд} \frac{G_Y^*}{G_Y}; \quad (3)$$

$$T_{пр}^* = T_{пр} \frac{V^*(O_2)}{V(O_2)}, \quad (4)$$

где  $G_Y^*$ ,  $V(O_2)_{пд}$  и  $T_{пр}^*$  – скорректированные расход угля, кислорода и длительность подогрева металлолома;  $\tau_{мп}^{пр}$  и  $\tau_{мп}$  – длительность межплавочного простоя для предстоящей и прецедентной плавки;  $G_Y$  и  $G_Y^{\max} = 4,8$  т –

прецедентный и максимально допустимый расход угля на подогрев.

Длительность плавки в целом  $T_{пл}$  скорректирована с учетом увеличения прецедентной длительности  $T_{пр}$  подогрева металлолома:

$$T_{пл}^* = T_{пл} + (T_{пр}^* - T_{пр}). \quad (5)$$

Моделирование алгоритма выбора оптимального прецедента и его коррекция (при наличии дефектов) показала, что затраты времени на его реализацию (при взаимодействии с мастером и оператором дистрибутора) на современных компьютерах не превышают 2 – 3 мин. Первичные данные для решения задачи построения программы управления предстоящей плав-

кой стали формируются по ходу выполнения текущей плавки в режиме реального времени. В этот же период решаются задачи поиска лучших плавок-прецедентов и шихтовки предстоящей плавки. Полностью формирование новой программы управления заканчивается во время завершения (выпуска) текущей плавки и оценки состояния конвертера.

Эффективность вышеизложенного подхода к управлению процессом выплавки стали в кислородном конвертере обеспечивается реализацией идеи непрерывного улучшения управлений, когда новое управляющее решение формируется на основе ситуационно выбранного наилучшего из ранее реализованных аналогичных решений-прецедентов. При этом важное значение имеет подбор метрик качества прецедентов. В частности, весьма полезно при управлении процессом выплавки стали включать в информационную модель прецедента показатель: затраты на выполнение конкретной плавки.

## Выводы

Выполнен анализ известных подходов и методов управления сложными металлургическими агрегатами. Изложена идея нового (по отношению к системам управления сложными агрегатами и комплексами) прецедентного метода online-накопления и использования опыта принятия управляющих решений в эргатических (человеко-машинных) системах управления. Разработан модифицированный цикл выработки и реализации управляющих решений и соответствующая ему функциональная схема системы управления агрегатами циклического действия. Применительно к управлению плавкой стали в конвертере представлены основные компоненты информационной модели прецедента и пример формирования программы управления предстоящей плавкой на основе данных прецедентной плавки. Отмечена более высокая эффективность управления предстоящей плавкой стали на основе прецедента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

## REFERENCES

1. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. М.: МЭИ, 2008. 400 с.
2. Maiworm M., Bähge T., Findeisen R. Scenario-based model predictive control: Recursive feasibility and stability // *IFAC – Papers Online*. 2015. Vol. 48. No. 8. P. 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.156>
3. Rawlings J.B., Mayne D.Q. *Model Predictive Control: Theory and Design*. Nob Hill Publishings, LLC, 2009.
4. Дозорцев В.М., Кнеллер Д.В. APC-усовершенствованное управление технологическими процессами // *Датчики и системы*. 2005. № 10. С. 56–62.
5. Кулаков С.М., Бондарь Н.Ф., Зимин В.В. О структуризации пространства подходов к исследованию автоматизированных систем на разных стадиях их жизненного цикла. В кн.: *Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. Труды VIII Всероссийской научно-практической конференции*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2011. С. 26–34.
6. Теория и практика прогнозирования в системах управления / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, Л.П. Мышляев и др. Кемерово, М.: изд. об-ние «Российские университеты»: Кузбассвуиздат – АСТШ, 2008. 487 с.
7. Мышляев Л.П. Системы автоматизации на основе натурно-модельного подхода. В 3-х томах. Т. 2. Системы автоматизации производственного назначения. Новосибирск: Наука, 2006. 483 с.
8. Богушевский В.С., Грабовский Г.Г., Михайлов В.М. и др. Компьютерная модель расчета шихтовки и продувки конвертерной плавки // *Сталь*. 2006. № 1. С. 18–21.
9. Богушевский В.С., Грабовский Г.Г., Церковницкий Н.С., Ушаков В.А. Система управления конвертерной плавкой // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2007. № 4. С. 232–235.
10. Pan R., Yang Q., Pan S.J. Mining competent case bases for case-based reasoning // *Artificial Intelligence*. 2007. Vol. 171. No. 16-17. P. 1039–1068. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2007.04.018>
11. Варшавский П.Р., Алехин Р.В. Метод поиска решений в интеллектуальных системах поддержки принятия решений на основе прецедентов // *International Journal "Information Models and Analyses"*. 2013. Vol. 2. No. 4. P. 385–392.
12. Avdeenko T.V., Makarova E.S. Integration of case-based and rule-based reasoning through fuzzy inference in decision support sys-
1. Rotach V.Ya. *Theory of Automatic Control*. Moscow: MEI, 2008, 400 p. (In Russ.).
2. Maiworm M., Bähge T., Findeisen R. Scenario-based model predictive control: Recursive feasibility and stability. *IFAC – Papers Online*. 2015, vol. 48, no. 8, pp. 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.156>
3. Rawlings J.B., Mayne D.Q. *Model Predictive Control: Theory and Design*. Nob Hill Publishings, LLC, 2009.
4. Dozortsev V.M., Kneller D.V. APC-advanced process control. *Dat-chiki i sistemy*. 2005, no. 10, pp. 56–62. (In Russ.).
5. Kulakov S.M., Bondar' N.F., Zimin V.V. On structuring the space of approaches to the study of automated systems at different stages of their life cycle. In: *Automation Systems in Education, Science and Production. Proceedings of the 8<sup>th</sup> All-Russ. Sci. and Pract. Conf.* Novokuznetsk: ITs SibSIU, 2011, pp. 26–34. (In Russ.).
6. Emel'yanov S.V., Korovin S.K., Myshlyayev L.P., etc. *Theory and Practice of Forecasting in Control Systems*. Kemerovo; Moscow: Rossiiskie universitety; Kuzbassvuzizdat – ASTSh, 2008, 487 p. (In Russ.).
7. Myshlyayev L.P. *Automation Systems Based on a Full-Scale Model Approach. Vol. 2. Automation Systems for Industrial Purposes*. Novosibirsk: Nauka, 2006, 483 p. (In Russ.).
8. Bogushevskii V.S., Grabovskii G.G., Mikhailov V.M., etc. Computer model for calculating the charge and purge of converter melting. *Stal'*. 2006, no. 1, pp. 18–21. (In Russ.).
9. Bogushevskii V.S., Grabovskii G.G., Tserkovnitskii N.S., Ushakov V.A. Converter melting control system. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2007, no. 4, pp. 232–235. (In Russ.).
10. Pan R., Yang Q., Pan S.J. Mining competent case bases for case-based reasoning. *Artificial Intelligence*. 2007, vol. 171, no. 16-17, pp. 1039–1068. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2007.04.018>
11. Varshavskii P.R., Alekhin R.V. Method of finding solutions in intelligent decision support systems based on CBR. *International Journal "Information Models and Analyses"*. 2013, vol. 2, no. 4, pp. 385–392. (In Russ.).
12. Avdeenko T.V., Makarova E.S. Integration of case-based and rule-based reasoning through fuzzy inference in decision support sys-

- tems // *Procedia Computer Science*. 2017. Vol. 103. P. 447–453. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.01.016>
13. Wan S., Li D., Gao J., Li J. A knowledge based machine tool maintenance planning system using case-based reasoning techniques // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2019. Vol. 58. P. 80–96. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.01.012>
  14. Thike P.H., Xu Z., Cheng Y., Jin Y., Shi P. Materials failure analysis utilizing rule-case based hybrid reasoning method // *Engineering Failure Analysis*. 2019. Vol. 95. P. 300–311. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2018.09.033>
  15. Guo Y., Chen W., Zhu Y.-X., Guo Y.-Q. Research on the integrated system of case-based reasoning and Bayesian network // *ISA Transactions*. 2019. Vol. 90. P. 213–225. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.12.049>
  16. Relicha M., Pawlewskib P. A case-based reasoning approach to cost estimation of new product development // *Neurocomputing*. 2018. Vol. 272. P. 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.05.092>
  17. Xia J., Chen G., Tan P., Zhang C. An online case-based reasoning system for coal blends combustion optimization of thermal power plant // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2014. Vol. 62. P. 299–311. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.04.036>
  18. Карпов Л.Е., Юдин В.Н. Адаптивное управление по прецедентам, основанное на классификации состояний управляемых объектов. В кн.: Труды Института системного программирования РАН. Т. 13. Ч. 2. М.: ИЦ ИСП, 2007. С. 37–58.
  19. Кулаков С.М., Трофимов В.Б., Добрынин А.С., Тараборина Е.Н. Прецедентный подход к формированию программ управления объектами циклического действия. В кн.: Системы автоматизации в образовании, науке и производстве AS'2017. Труды XI Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием), 14-16 декабря 2017 г. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2017. С. 11–19.
  20. Monfeta D., Corsib M., Choinièreb D., Arkhipovab E. Development of an energy prediction tool for commercial buildings using case-based reasoning // *Energy and Buildings*. 2014. Vol. 81. P. 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.017>

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Станислав Матвеевич Кулаков**, д.т.н., профессор кафедры автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0003-0928-1753  
**E-mail:** kulakov-ais@mail.ru

**Роман Сергеевич Койнов**, старший преподаватель кафедры автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0001-5547-5511  
**E-mail:** koynov\_rs@mail.ru

**Михаил Васильевич Ляховец**, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет  
**E-mail:** mvlyakhovets@gmail.com

**Елена Николаевна Тараборина**, к.т.н., доцент кафедры автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет  
**ORCID:** 0000-0002-4835-396X  
**E-mail:** taraborina@list.ru

**Stanislav M. Kulakov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair "Automation and Information Systems", Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0003-0928-1753  
**E-mail:** kulakov-ais@mail.ru

**Roman S. Koinov**, Senior Lecturer of the Chair "Automation and Information Systems", Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0001-5547-5511  
**E-mail:** koynov\_rs@mail.ru

**Mikhail V. Lyakhovets**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair "Automation and Information Systems", Siberian State Industrial University  
**E-mail:** mvlyakhovets@gmail.com

**Elena N. Taraborina**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Automation and Information Systems", Siberian State Industrial University  
**ORCID:** 0000-0002-4835-396X  
**E-mail:** taraborina@list.ru

## ВКЛАД АВТОРОВ

## CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**С. М. Кулаков** – анализ известных подходов к управлению сложными технологическими объектами, модификация CBR-цикла принятия решений, алгоритмизация процедуры коррекции прецедентов.

**S. M. Kulakov** – analysis of known approaches to managing complex technological objects, modification of the CBR decision-making cycle, algorithmization of the reasoning correction procedure.

**Р. С. Койнов** – обзор первоисточников, разработка функциональной структуры системы управления на основе метода прецедентов, разработка информационной модели прецедента применительно к управлению плавкой стали в кислородном конвертере.

**М. В. Ляховец** – разработка методики и формул коррекции параметров плавки-прецедента.

**Е. Н. Тараборина** – моделирование процесса принятия управляющих воздействий и формирование примера применения метода прецедентов.

**R. S. Koinov** – review of primary sources, development of the functional structure of the control system based on CBR method, development of the reasoning information model in relation to the control of steel melting in an oxygen converter.

**M. V. Lyakhovets** – development of the method and formulas for correction of melting parameters-reasoning.

**E. N. Taraborina** – modeling of taking control actions and forming an example of the use of CBR method.

Поступила в редакцию 25.09.2021

После доработки 09.11.2021

Принята к публикации 16.11.2021

Received 25.09.2021

Revised 09.11.2021

Accepted 16.11.2021



<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2328>



## ПАМЯТИ МИХАИЛА ВАСИЛЬЕВИЧА АСТАХОВА



25 мая 2022 года на 75-м году жизни скончался Михаил Васильевич Астахов – доктор химических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования РФ, лауреат Премии Правительства РФ в области образования.

Став студентом МИСиС в конце 1960-х, Михаил Васильевич посвятил своей альма-матер более полувека, пройдя путь от ассистента преподавателя до заведующего кафедрой физической химии.

Многолетнее служение науке и образованию профессора Астахова отражено во множестве ярких достижений, в числе которых авторские изобретения, более 150 научных работ, монографий, учебных пособий, его заслуги высоко оценены академическим сообществом России и мира.

Михаил Васильевич Астахов обладал выдающимся научным и педагогическим талантом, эрудицией и смелостью мышления, даром увлекать за собой коллег и студентов. Под его руководством были успешно подготовлены восемь диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Учениками профессора Астахова могли себя называть не только студенты и молодые ученые – он всегда находил время и возможность открывать путь в науку талантливым школьникам, возглавляя проект «Инженерные классы» НИТУ «МИСиС» по направлению «Новые материалы». Его проектных смен с нетерпением ждали старшеклассники в Сириусе и Артеке.

Профессор Астахов долгое время был членом редакционной коллегии нашего журнала.

Светлая память о Михаиле Васильевиче навсегда сохранится в наших сердцах.

Мы скорбим о безвременном уходе нашего коллеги и выражаем глубокие и искренние соболезнования его родным и близким.



<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2329>



## ПОДГОРОДЕЦКИЙ ГЕННАДИЙ СТАНИСЛАВОВИЧ (23.01.1958 – 21.06.2022)



21 июня 2022 года на 65-ом году жизни скоропостижно скончался Подгородецкий Геннадий Станиславович, доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий (ЭРПТ) НИТУ МИСиС.

Геннадий Станиславович родился 23 января 1958 г. Окончил МИСиС в 1980 г. по специальности «Металлургия черных металлов». С 1982 по 1992 гг. работал на кафедре в качестве младшего, а затем старшего научного сотрудника. В 1985 г. защитил диссертацию кандидата технических наук. Затем его трудовой путь

продолжился в качестве генерального директора Ассоциации предприятий и организаций черной и цветной металлургии в области экологии «Металлургэкология» (с 1992 по 2007 гг.).

В 2007 г. Подгородецкий вернулся на кафедру и продолжил свою трудовую деятельность в НИТУ МИСиС до самого конца. С 2007 г. работал в должности доцента на кафедре, которой впоследствии руководил в период с 2010 по 2016 гг. Являлся членом Ученого совета Университета.

Его научная работа была направлена на исследования в области переработки техногенных отходов металлургии, энергетики, химической промышленности и твердых бытовых отходов в барботажных процессах, а также разработку технологии безотходной газогенерации с полным селективным извлечением полезных компонентов углей. Он является известным и признанным специалистом в области теории и технологии барботажных процессов.

Подгородецкого Г.С. отличало умение организации и проведения промышленных экспериментов. Он принимал непосредственное участие в разработке, строительстве, пуске и эксплуатации опытно-промышленной печи жидкофазного восстановления на НЛМК. С 2014 по 2016 гг. руководил проектом «Разработка технологии и технических решений политопливного газогенератора на базе местных и возобновляемых топливных ресурсов» в рамках выполнения Федеральной целевой программы.

Результаты его исследований публиковались в ведущих научных отечественных и зарубежных журналах.

Светлая память о нем навсегда останется в наших сердцах. Кафедра ЭРПТ НИТУ МИСиС выражает глубокие и искренние соболезнования родным и близким!

*Геннадий Станиславович долгое время являлся членом редакционной коллегии нашего журнала и принимал активное участие в его работе. Коллектив журнала присоединяется к соболезнованиям родным и близким и скорбит об утрате коллеги.*



21 июня скоропостижно скончался мой друг и старший товарищ – Подгорецкий Геннадий Станиславович.

Ушел из жизни прекрасный ученый, преподаватель, талантливый изобретатель и умелый экспериментатор. Ушел в расцвете творческих сил, не завершив многие прорывные проекты, автором которых он являлся и над которыми работал, не жалея сил, здоровья и времени. Не выдержало сердце, через которое он пропускал не только свои неудачи, но и неудачи и ошибки друзей и коллег, глубоко переживал за состояние металлургической науки, на деле бескомпромиссно противостоял

упрощенчеству и непрофессионализму. К нему можно было обратиться по многим научным вопросам и получить обоснованные мудрые советы. Он был творческим человеком – прекрасно пел и играл на гитаре, был добрым и справедливым, ценил юмор и добрую шутку. Нас связывала 37-летняя дружба.

Светлая память о нашем друге и коллеге останется в наших сердцах.

*Заместитель генерального директора  
ООО «ОгнеупорТрейдГрупп»,  
к.т.н., Вильданов С.К.*

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 27.06.2022. Формат 60×90 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бум. офсетная № 1.  
Печать цифровая. Усл. печ. л. 9,25. Заказ 15198. Цена свободная.

---

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

# IZVESTIYA

## FERROUS METALLURGY

ROLLING OF LONG-LENGTH RAILS WITH ACCELERATION

RESOURCE EFFICIENCY OF METALLURGICAL PRODUCTION

VISCOSITY OF NIOBIUM OXIDE SYSTEMS FOR PRODUCTION OF COMPLEX FERROALLOYS

FUNDAMENTAL STUDIES OF PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF ENVIRONMENTALLY FRIENDLY FLUORINE-FREE SLAGS AND THEIR USE IN LADLE STEEL INDUSTRY

ANALYSIS OF SLAG MODE OF BLAST FURNACE MELTING USING MODEL DECISION SUPPORT SYSTEMS

COMPOSITION OF NON-METALLIC INCLUSIONS AND MICROSTRUCTURE OF ELECTRIC ARC COATING FORMED USING THE FLUX-CORED WIRE OF Fe – C – Si – Mn – Cr – Ni – Mo SYSTEM

FRACTOGRAPHY OF FRACTURE SURFACE OF CrMnFeCoNi HIGH-ENTROPY ALLOY AFTER ELECTRON-BEAM PROCESSING

ANALYSIS OF THE DRAWING MILL DRIVE OPERATION

AUTOMATED CONTROL OF COMPLEX METALLURGICAL UNITS BASED ON THE CBR METHOD

IN MEMORY OF MIKHAIL VASIL'EVICH ASTAKHOV

PODGORODETSKII GENNADII STANISLAVOVICH (23.01.1958 – 21.06.2022)