

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY

fermet.misis.ru

2025 Том 68 № 4
Vol. No.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Перспективы создания быстрорежущих
высокоэнтропийных сталей

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

Перспективные конструкции газоанализаторов для металлургии

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

Металлизация рудноугольных брикетов в кольцевой печи,
отапливаемой генераторным газом

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Научно-технический журнал

Издается с января 1958 г. Выпускается 6 раз в год

2025 Том 68 № 4
Vol. No.

IZVESTIYA FERROUS METALLURGY

Scientific and Technical Journal

Published since January 1958. Issued 6 times a year

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:



Редакционная коллегия:

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

В. Д. Белов, д.т.н., профессор, НИТУ МИСИС, г. Москва

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

Е. П. Волынкина, д.т.н., советник, ОЮЛ «Кузбасская Ассоциация переработчиков отходов», г. Новокузнецк

С. М. Горбатюк, д.т.н., профессор, НИТУ МИСИС, г. Москва

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

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

А. Н. Дмитриев, д.т.н., профессор, академик РАЕН, академик АИН РФ, г. Екатеринбург

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

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

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

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

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

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

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

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

К. Л. Косырев, д.т.н., академик РАЕН, ОАО «Электростальский завод тяжелого машиностроения», г. Москва

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

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

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

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

В соответствии п. 5 Правил формирования перечня ВАК журнал «Известия вузов. Черная металлургия» входит в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, публикация в которых учитывается при защитах кандидатских и докторских диссертаций как индексируемый в МБД.

Главный редактор:

Леопольд Игоревич Леонтьев, академик РАН, советник, Президиум РАН; д.т.н., профессор, НИТУ «МИСИС»; главный научный сотрудник, Институт металлургии УрО РАН
Россия, 119049, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Заместитель главного редактора:

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

Издатель:

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Адреса подразделений редакции:

в Москве

Россия, 119049, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1
Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
Тел.: +7 (495) 638-44-11 E-mail: ferrous@isis.ru

в Новокузнецке

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

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

С. А. Никулин, д.т.н., профессор, чл.-корр. РАЕН, НИТУ МИСИС, г. Москва

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

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

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

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

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

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

Л. М. Симонян, д.т.н., профессор, НИТУ МИСИС, г. Москва

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

С. В. Солодов, к.т.н., НИТУ МИСИС, г. Москва

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

Г. Танг, Институт перспективных материалов университета Циньхуа, г. Шеньжень, Китай

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

М. Р. Филонов, д.т.н., профессор, НИТУ МИСИС, г. Москва

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

О. Ю. Шешуков, д.т.н., профессор, УрФУ, г. Екатеринбург

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

А. Б. Юрьев, д.т.н., профессор, ректор, СибГИУ, г. Новокузнецк

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

Индексирование: Scopus, Russian Science Citation Index (RSCI), Research Bible, Chemical Abstracts, 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

Founders:



Editorial Board:

Sailaubai O. Baisanov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Republic of Kazakhstan
Vladimir D. Belov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST MISIS, Moscow
Anatolii A. Brodov, Cand. Sci. (Econ.), Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy, Moscow
Il'ya V. Chumanov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., South Ural State Research University, Chelyabinsk
Andrei N. Dmitriev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician, RANS, A.M. Prokhorov Academy of Engineering Sciences, 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
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.), Academician of RANS, Electrosteel Heavy Engineering Works JSC, Moscow
Yuliya A. Kurganova, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Bauman Moscow State Technical University, 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

Editor-in-Chief:

Leopol'd I. Leont'ev, Academician, Adviser of the Russian Academy of Sciences; Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST "MISIS"; Chief Researcher, Institute of Metallurgy UB RAS, Moscow
4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation
National University of Science and Technology "MISIS"

Deputy Editor-in-Chief:

Evgenii V. Protopopov, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk

Publisher:

National University of Science and Technology "MISIS"

Editorial Office Address:

in Moscow

4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation
National University of Science and Technology "MISIS"
Tel.: +7 (495) 638-44-11 E-mail: ferrous@isis.ru

in Novokuznetsk

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

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, Sydney, 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
Marcus Speidel, Dr. Natur. Sci., Prof., Swiss Academy of Materials, Switzerland
Nikolai A. Spirin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Ural Federal University, Yekaterinburg
Guoi Tang, 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.), Advisor, ALE "Kuzbass Association of Waste Processors", Novokuznetsk
Aleksei B. Yur'ev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, 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

In accordance with paragraph 5 of the Rules for the formation of the Higher Attestation Commission list journal "Izvestiya. Ferrous metallurgy" is included in the list of leading peer-reviewed scientific journals, publication in which is taken into account in the defense of candidate and doctoral dissertations, as indexed in international data bases.

Indexed: Scopus, Russian Science Citation Index (RSCI), Research Bible, Chemical Abstracts, OCLC and Google Scholar

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



Articles are available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Харченко А.С., Сысоев В.И., Сибэгатуллин С.К., Дзюба А.В., Савинов А.С., Харченко Е.О. Моделирование распределения компонентов, выделившихся из замасленной окалины, между водо-газо-пылевыми средами системы газоочистки доменной печи 332
- Шкирмونتв А.П. Моделирование работы ферросплавной печи при увеличении мощности и диаметра электродов 339

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ
ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

- Васина М.В., Башенко Л.П. Перспективные конструкции газоанализаторов для металлургии 342

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Громов В.Е., Миненко С.С., Чапайкин А.С., Семин А.П., Шлярова Ю.А. Перспективы создания быстрорежущих высокоэнтропийных сталей 349
- Яреско С.И., Балакиров С.Н., Осколкова Т.Н. Предельные энергетические характеристики при лазерной импульсной обработке вольфрамокобальтовых твердых сплавов 357

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ
ПРОМЫШЛЕННОМ
И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ,
ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

- Лехов О.С., Билалов Д.Х. Расчет температуры и термоупругих напряжений в бойках при получении стальных полых заготовок на установке совмещенного литья и деформации. Часть 1 366
- Евстигнеев А.И., Чернышова Д.В., Одинок В.И., Дмитриев Э.А., Евстигнеева А.А., Колошенко Ю.Б., Потянихин Д.А. Моделирование и оптимизация влияния температурных швов на напряженно-деформированное состояние сферических металлических литейных форм 372
- Куликов Б.П., Сторожев Ю.И., Потапенко А.С. Металлизация рудноугольных брикетов в кольцевой печи, отапливаемой генераторным газом 383
- Сивков А.С., Чибизова С.И., Апасова А.Д. Направления совершенствования конструкции и тепловой работы вращающейся печи для реализации технологии производства металлургической извести из мела 395

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- Kharchenko A.S., Sysoev V.I., Sibagatullin S.K., Dzyuba A.V., Savinov A.S., Kharchenko E.O. Modeling the distribution of components emitted from oiled scale between water, gas, and dust media in blast furnace dedusting plant 332
- Shkirmontov A.P. Modeling the operation of ferroalloy furnace with increased power and electrode diameters 339

ECOLOGY AND RATIONAL USE
OF NATURAL RESOURCES

- Vasina M.V., Bashchenko L.P. Promising designs of gas analyzers for metallurgy 342

MATERIALS SCIENCE

- Gromov V.E., Minenko S.S., Chapaikin A.S., Semin A.P., Shlyarova Yu.A. Prospects for creation of high-speed high-entropy steels 349
- Yaresko S.I., Balakirov S.N., Oskolkova T.N. Limiting energy characteristics during laser pulse treatment of tungsten-cobalt hard alloys 357

INNOVATIONS
IN METALLURGICAL INDUSTRIAL
AND LABORATORY EQUIPMENT,
TECHNOLOGIES AND MATERIALS

- Lekhov O.S., Bilalov D.Kh. Calculation of temperature and thermoelastic stresses in strikers during production of hollow steel billets in a unit of combined casting and deformation. Part 1 366
- Evstigneev A.I., Chernyshova D.V., Odinokov V.I., Dmitriev E.A., Evstigneeva A.A., Koloshenko Yu.B., Potyanikhin D.A. Modeling and optimization of the effect of temperature seams on stress-strain state of spherical metal casting molds 372
- Kulikov B.P., Storozhev Yu.I., Potapenko A.S. Metallization of ore-coal briquettes in an annular furnace heated by generator gas 383
- Sivkov A.S., Chibizova S.I., Apasova A.D. Improving the design and thermal operation of a rotary kiln for production of metallurgical lime from chalk 395

СОДЕРЖАНИЕ (продолжение)

CONTENTS (Continuation)

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И АВТОМАТИЗАЦИЯ
В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

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

- Спирин Н.А., Гурин И.А., Лавров В.В.** Информа-
ционно-моделирующая система оценки нестабиль-
ности функционирования доменной печи 402
- Дмитриев А.Н., Витькин Д.А., Золотых М.О., Вить-
кина Г.Ю.** Математическая модель состояния фу-
теровки главного желоба доменной печи 411
- Шалаевский Д.Л.** Методика расчета плоскостности
стальных холоднокатаных полос 417

- Spirin N.A., Gurin I.A., Lavrov V.V.** Information mode-
ling system for assessing instability of blast furnace
functioning 402
- Dmitriev A.N., Vit'kin D.A., Zolotykh M.O., Vit'-
kina G.Yu.** Mathematical model of the blast furnace
main trough lining condition 411
- Shalaevskii D.L.** Methodology for calculating the flatness
of cold-rolled steel strips 417

В ПОРЯДКЕ ДИСКУССИИ

IN THE ORDER OF DISCUSSION

- Рощин В.Е., Рощин А.В.** Электрохимия восстано-
вительных процессов и перспективы развития восста-
новительных технологий 424

- Roshchin V.E., Roshchin A.V.** Electrochemistry of reduc-
tion processes and prospects for the development of
reduction technologies 424



УДК 669.162.1

DOI 10.17073/0368-0797-2025-4-332-338



Оригинальная статья

Original article

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ, ВЫДЕЛИВШИХСЯ ИЗ ЗАМАСЛЕННОЙ ОКАЛИНЫ, МЕЖДУ ВОДО-ГАЗО-ПЫЛЕВЫМИ СРЕДАМИ СИСТЕМЫ ГАЗООЧИСТКИ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

А. С. Харченко[✉], В. И. Сысоев, С. К. Сибгатуллин,
А. В. Дзюба, А. С. Савинов, Е. О. Харченко

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

✉ as.mgtu@mail.ru

Аннотация. Физическим моделированием с использованием вертикальной трубчатой электропечи оценили распределение масла из замасленной окалины между различными видами отходов газоочистки доменного производства: пылью, шламом и шламовой водой. Согласно математическому моделированию теплового состояния металлического контейнера с замасленной окалиной интенсивное испарение масла в доменной печи начинается после его загрузки и опускания вдоль шахты на глубину, примерно соответствующую трем подачам. Масло пропускали через нагретый до 500 °С слой агломерата и окатышей Михайловского ГОК массой 0,6 кг и крупностью частиц 10 – 12 мм. Вместе с парами масла в слой железорудного сырья (ЖРС) подавали (вдували) тонко измельченный материал, имитировавший по компонентному и фракционному составу смесь колошниковой пыли и шламов вакуумной фильтровальной установки (ВФУ) доменного производства, взятых в соотношении 36:64. Физическое моделирование обеспечивало соответствие фактическому газодинамическому режиму в зоне рудного гребня доменной печи, исходя из равенства критерия Рейнольдса. Значение этого критерия, равное 215, было достигнуто в лабораторной модели при подаче аргона с расходом 70 л/мин. По результатам эксперимента распределение масла составило, % от исходного количества: 74,8 % разложилось на слое ЖРС, соответствующем трем подачам; 9,1 % перешло в колошниковую пыль; 15,9 % перешло в шлам ВФУ; в воде мокрой газоочистки масло отсутствовало; 0,2 % (30 мг) масла проходило мокрую газоочистку в форме аэрозоля; на стенках трубопровода наблюдалось незначительное количество сажи. Газовая фаза процессов разложения масла содержала: 70 – 90 % H₂; 1 – 5 % CO; 0,5 – 7,0 % CO₂; 3,2 – 22,2 % CH₄; 0,1 – 2,5 % Σ(C₂H₄, C₂H₆, C₃H₆, C₃H₈). Содержание контролируемого в России бензо(а)пирена в парах масла не превышало 0,00058 %.

Ключевые слова: утилизация техногенных отходов, замасленная окалина, методы переработки, испарение масла, доменная печь

Для цитирования: Харченко А.С., Сысоев В.И., Сибгатуллин С.К., Дзюба А.В., Савинов А.С., Харченко Е.О. Моделирование распределения компонентов, выделившихся из замасленной окалины, между водо-газо-пылевыми средами системы газоочистки доменной печи. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2025;68(4):332–338. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-332-338>

MODELING THE DISTRIBUTION OF COMPONENTS EMITTED FROM OILED SCALE BETWEEN WATER, GAS, AND DUST MEDIA IN BLAST FURNACE DEDUSTING PLANT

A. S. Kharchenko[✉], V. I. Sysoev, S. K. Sibgatullin, A. V. Dzyuba,
A. S. Savinov, E. O. Kharchenko

Nosov Magnitogorsk State Technical University (38 Lenina Ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk Region 455000, Russian Federation)

✉ as.mgtu@mail.ru

Abstract. Distribution of oil from oiled scale between various types of waste from blast furnace dedusting plant: dust, sludge, and slime water was estimated by physical modeling using a vertical tubular electric furnace. According to the mathematical modeling of thermal state of a metal container with oiled scale, intensive evaporation of oil in a blast furnace begins after it is loaded and lowered along the shaft to a depth approximately corresponding to three feeds. The oil was passed through a layer of sinter and pellets of the Mikhailovsky GOK heated to 500 °C with a mass of 0.6 kg and

a particle size of 10 – 12 mm. Together with oil vapors, finely ground material was injected into the layer of iron ore raw materials (IORM), which imitated in component and fractional composition a mixture of blast furnace dust and sludge from a vacuum filtration plant (VFC) of blast furnace shop, taken in a ratio of 36:64. The physical modeling ensured compliance with the actual gas-dynamic mode in the area of blast furnace ore ridge, based on equality of the Reynolds criterion. The value of this criterion, equal to 215, was achieved in the laboratory model when argon was supplied with a flow rate of 70 L/min. According to the experimental results, distribution of oil was, % of the initial amount: 74.8 % decomposed on the IORM layer corresponding to three feeds; 9.1 % turned into blast furnace dust; 15.9 % turned into VFC sludge; there was no oil in the wet gas purification water; 0.2 % (30 mg) of the oil underwent wet dedusting in the form of an aerosol; a small amount of soot was observed on the pipeline walls. Gas phase of oil decomposition contained: 70 – 90 % H₂; 1.5 % CO; 0.5 – 7.0 % CO₂; 3.2 – 22.2 % CH₄; 0.1 – 2.5 % Σ(C₂H₄, C₂H₆, C₃H₆, C₃H₈). The content of benzo(a)pyrene controlled in Russia in oil vapor did not exceed 0.00058 %.

Keywords: technogenic waste disposal, oiled scale, recycling methods, oil evaporation, blast furnace

For citation: Kharchenko A.S., Sysoev V.I., Sibagatullin S.K., Dzyuba A.V., Savinov A.S., Kharchenko E.O. Modeling the distribution of components emitted from oiled scale between water, gas, and dust media in blast furnace dedusting plant. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(4):332–338. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-332-338>

ВВЕДЕНИЕ

Актуальным направлением повышения экологичности процесса производства и обработки черных металлов является рециклинг техногенных отходов в производство [1; 2]. Одним из наиболее ценных железосодержащих видов отходов предприятий черной металлургии является окалина прокатных цехов [3 – 5], которая состоит почти исключительно из оксидов железа (содержание железа на уровне 69 – 72 %) и практически не содержит пустой породы [6; 7]. Различают две разновидности прокатной окалины, отличающихся размером частиц и содержанием масла. Крупная фракция (+2 мм) прокатной окалины (до 70 – 80 % от общего ее количества) с содержанием масла менее 3 % эффективно утилизируется в аглошихту. Мелкая разновидность окалины (размер частиц менее 100 мкм) содержит значительное количество масла (до 20 – 30 %) и ее утилизация в аглошихту затруднена. При спекании аглошихты с повышенным содержанием масла происходит испарение его несгоревших остатков с формированием в окислительных зонах газового тракта агломашины взрывоопасных смесей, а после конденсации масла происходит загрязнение лопаток эксгаустера и сокращается их ресурс [8].

Альтернативные способы утилизации замасленной прокатной окалины предполагают предварительную химическую обработку окалины (отмывание растворами щелочей и поверхностно-активных веществ) [9; 10] или предварительную термическую обработку (роторные вращающиеся печи, термостаты, смесители) [11; 12] с последующей переработкой обезмасленного продукта в агломерационном переделе [14; 15] или брикетировании [16]. Однако в промышленном масштабе перечисленные методы предварительной подготовки замасленной окалины не реализованы по технико-экономическим соображениям, поэтому в целом проблема остается нерешенной.

Современной альтернативой многоступенчатой и дорогостоящей подготовки замасленной прокатной окалины к доменной плавке через агломерацию или брикетирование с предварительным обезмасливанием

является разработка способа утилизации замасленной окалины прямой загрузкой в доменную печь [17; 18]. Согласно патенту [17], для загрузки замасленной окалины в доменную печь вместо малопрочных брикетов из нее можно использовать металлическую упаковку в виде контейнера, плавящуюся при температуре не менее 1500 °С. Этот способ отличается минимальным количеством дополнительного оборудования, сокращает время подготовки, устраняет необходимость дополнительного хранения и утилизации извлеченных органических соединений, очищения загрязненной оборотной воды. Однако при загрузке кускованной замасленной прокатной окалины в доменную печь неполное разложение паров масла, фильтрующихся через слой шихтовых материалов, может осложнить работу газоочистного оборудования печи [19]. В связи с этим целесообразно оценить влияние масла замасленной окалины на состав колошниковой пыли, доменных шламов, шламовой воды и формирование газовой фазы в газоотводах доменной печи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе распределение масла между различными видами отходов газоочистки доменного производства (пылью, шламом и шламовой водой) оценивали посредством физического моделирования с использованием вертикальной трубчатой электропечи. Нагретый до 500 °С слой из агломерата и окатышей Михайловского ГОК крупностью 10 – 12 мм массой 0,6 кг порционно подавали смесь из имитировавших по компонентному и фракционному составам колошниковой пыли и шламов вакуумной фильтровальной установки (ВФУ) в соотношении 36:64.

Железорудное сырье (ЖРС) размещали в изотермической зоне печи. Его массу определяли по результатам расчета количества материалов, располагающихся над горизонтом интенсивного испарения масла в печи. Согласно математическому моделированию теплового состояния металлического контейнера с замасленной окалиной интенсивное испарение масла в доменной печи начинается после его загрузки и опускания вдоль

шахты на глубину, соответствующую примерно трем подачам. В результате пары масла проходят через слой железорудного сырья, примерно соответствующий по высоте трем подачам [20 – 22].

Для создания тока газа, в котором происходит смешение пыли и масла, использовали аргон первого сорта (99,987 %) по ГОСТ 10157 – 2016 (расход 70 л/мин), что обеспечивало величину критерия Рейнольдса, соответствующего фактическому газодинамическому режиму в зоне рудного гребня доменной печи. На выходе из печи была установлена широкая емкость для осаждения пыли, моделирующая циклон газоочистки доменной печи, а далее по ходу движения газа находилась емкость с водой, моделирующая водную газоочистку газа в скрубберах с улавливанием наиболее тонких фракций пыли и отбором шлама (см. рисунок).

Параметры движения газа и материалов в лабораторной установке моделировали для следующих условий работы доменной печи:

- среднесуточный расход железорудного сырья – 6278 т;
- доля окатышей от массы железорудного сырья – 36 %;
- среднесуточный расход замасленной окалины (1 % от массы железорудного сырья) – 63 т;
- среднесуточное производство чугуна – 3798 т;
- среднесуточный выход колошникового газа – 7 139 563 м^3 ;
- содержание масла в замасленной окалине – 15 %;
- масса масла в замасленной окалине – 9,4 т;
- содержание воды в замасленной окалине – 10 %;
- масса воды в замасленной окалине – 6,3 т;
- масса железорудного сырья в одной подаче – 39 т;
- выход колошниковой пыли – 4,6 кг/т чугуна;
- выход шламов вакуумной фильтрационной установки – 8,1 кг/т чугуна.

Компонентный состав пыли для лабораторных экспериментов был следующим:

1. «Колошниковая пыль» (36 % от общей массы):
 - по фракционному составу: 10 % класса 1 – 3 мм и 90 % класса 0 – 1 мм;
 - по компонентному составу:
 - 75 % железорудной смеси (64 % агломерата и 36 % окатышей);
 - 25 % коксовой пыли.
2. «Шламная часть» (64 % от общей массы):
 - по фракционному составу: 100 % класса 0 – 0,2 мм;
 - по компонентному составу:
 - 75 % железорудной смеси (64 % агломерата и 36 % окатышей от общего ее количества);
 - 25 % коксовой пыли.

В процессе исследования отбирали пробы газа, анализировали их на содержание одно-, двух- и трехатомных газов, а также легких углеводородов с использованием газохроматографического комплекса «Хроматэк Кристалл 5000». Для анализа использовали насадочную колонку HayeSep Q длиной 3 м и насадочную колонку NaX длиной 3 м с предколонкой Carboxen длиной 0,5 м.

Отбирали пробы масла и выявляли в нем содержание семи полиядерных ароматических углеводородов (ПАУ) (флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, хризен, бензо(а)пирен), входящих в список из 16 ПАУ, классифицируемых Агентством по охране окружающей среды США (US Environmental Protection Agency, US EPA) как приоритетные загрязняющие вещества. Хроматографический анализ масла проводили с использованием капиллярной колонки CR-5ms (5 % дифенил / 95 % диметил(поли)силоксан), 30 м × 0,32 мм × 0,25 мкм.

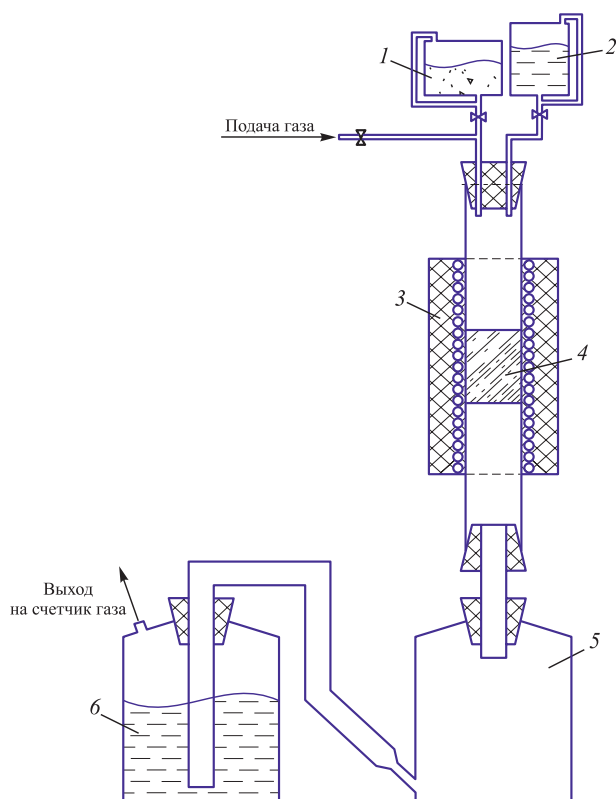


Схема экспериментальной установки для физического моделирования влияния масла на состав колошниковой пыли, шлама и воды:

- 1 – резервуар с пылью; 2 – резервуар с маслом;
- 3 – лабораторная электрическая трубчатая печь;
- 4 – слой железорудного сырья;
- 5 – емкость для «сухого» улавливания пыли;
- 6 – емкость с водой для «мокрого» улавливания шлама

Scheme of experimental installation for physical modeling of the effect of oil on composition of blast furnace dust, sludge and water:

- 1 – dust bunker; 2 – oil bunker; 3 – laboratory electric tubular furnace;
- 4 – layer of iron ore raw materials; 5 – bottle for “dry” dust collection;
- 6 – bottle for “wet” sludge collection

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты расчетов параметров лабораторного исследования:

Масса масла для моделирования фильтрации паров масла в объеме, соответствующем одной подаче, через слой ЖРС, г	0,3
Количество газа, требуемое на одну подачу, исходя из массовой доли паров масла в колошниковом газе в доменной печи, л	228
Продолжительность введения одной порции масла, мин	3
Масса пыли, загружаемой в лабораторную установку, в объеме, соответствующем одной подаче, г	1,5
Критерий Рейнольдса, Re	215
Число подач в лабораторной установке	50

Для определения содержания масла провели термогравиметрический анализ собранных образцов пыли и шлама при нагреве их в среде аргона. В результате потери массы составили: для пыли – 5,2 %, для шлама – 4,9 %. При соотношении между пылью и шламом 36:64 общее содержание масла в образцах шлама и пыли после опыта составило 5,0 %.

Результаты упаривания воды из емкости б после окончания опыта не показали наличия значимого количества масла в водной фазе. Концентрацию аэрозоля масла после водной очистки определяли из парогазовой пробы, отобранной с использованием насоса-пробоотборника НП-ЗМ в соответствии с ГОСТ Р 51945 – 2002. Для определения применяли трубки индикаторные на аэрозоли масел.

Таким образом, по результатам лабораторных экспериментов распределение масла было следующим, % от исходного количества масла:

- 74,8 – разложение на слое ЖРС, соответствующем трем подачам;
- 9,1 – переход в колошниковую пыль;
- 15,9 – в составе шлама ВФУ;
- 0,2 (30 мг) – проходит мокрую газоочистку в форме аэрозоля.

При проведении экспериментов на стенках трубопровода наблюдали незначительное количество сажи. В воде мокрой газоочистки масло отсутствовало. Это свидетельствует о почти полной адсорбции его взвесью

мелких частиц коксовой пыли, которая в дальнейшем была отфильтрована, высушена и вошла в состав шлама вакуумной фильтрационной установки. В промышленных условиях указанный фактор облегчит обработку оборотной воды.

Проанализирован химический состав газовой фазы с продуктами разложения масла. Для разных газовых проб содержание основных компонентов находилось в следующих интервалах: 70 – 90 % H_2 ; 1 – 5 % CO ; 0,5 – 7,0 % CO_2 ; 3,2 – 22,2 % CH_4 ; 0,1 – 2,5 % $\Sigma (C_2H_4, C_2H_6, C_3H_6, C_3H_8)$. Происхождение компонентов газовой фазы связано с протеканием процессов разложения масла по трем основным направлениям:

1 – (каталитическое) дегидрирование углеводородов масла с разрывом связей С–Н. Проходит с выделением газообразного водорода и образованием непредельных соединений, склонных к полимеризации и окислению. Интенсифицируется оксидами кальция, железа, марганца;

2 – (каталитический) крекинг углеводородов масла с разрывом связи С–С. При крекинге выделяются углеводороды меньшей молекулярной массы, в том числе газообразные углеводороды (метан, этан, пропан, бутан). Существенно интенсифицируется при наличии в силикатной связке агломерата сложных силикатов и алюмосиликатов, таких как пироксен, оливины и др.

3 – восстановление оксидов железа с образованием оксидов углерода CO и CO_2 . Интенсифицируется при увеличении температуры и использовании железорудного сырья с повышенным показателем восстановимости.

Результаты анализа проб масла на содержание в нем некоторых полиядерных ароматических углеводородов представлены в таблице. Согласно результатам, содержание контролируемого в России бензо(а)пирена в парах масла не превышает 0,00058 %.

Выводы

Экспериментально проведена оценка распределения масла замасленной окалины между различными

Характеристики и содержание полиядерных ароматических углеводородов в пробе конденсата паров масла

Characteristics and content of polynuclear aromatic hydrocarbons in the oil vapor condensate sample

Вещество	Флуорен	Фенантрен	Антрацен	Флуорантен	Пирен	Хризен	Бензо(а)пирен
Молекулярная формула	$C_{13}H_{10}$	$C_{14}H_{10}$	$C_{14}H_{10}$	$C_{16}H_{10}$	$C_{16}H_{10}$	$C_{18}H_{12}$	$C_{20}H_{12}$
Молекулярная масса, а.е.м.	166	178	178	202	202	228	252
Температура кипения, °С	294	340	340	382	402	448	495
Класс канцерогенной опасности (по данным МАИР*)	3	3	3	3	3	2В	1
Содержание в пробе, %	$8,0 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-2}$	–	$7,9 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-4}$

*МАИР – Международное агентство по изучению рака (англ. International Agency for Research on Cancer, IARC).

видами отходов газоочистки доменного производства (пылью, шламом и шламовой водой) посредством физического моделирования с использованием вертикальной трубчатой электропечи. Смесь агломерата и окатышей Михайловского ГОК (крупность 10 – 12 мм, масса 0,6 кг) имитировала по компонентному и фракционному составам колошниковую пыль и шламы вакуумной фильтровальной установки в соотношении 36:64. При прохождении через нагретый до 500 °С слой этой смеси 74,8 % масла разложилось на слое ЖРС, соответствующем трем подачам; 9,1 % перешло в колошниковую пыль; 15,9 % перешло в шламы ВФУ. Мокрую газоочистку масло (0,2 %) проходило в форме аэрозоля; в воде мокрой газоочистки оно отсутствовало.

Газовая фаза процессов разложения масла содержала 70 – 90 % H_2 ; 1 – 5 % CO ; 0,5 – 7,0 % CO_2 ; 3,2 – 22,2 % CH_4 ; 0,1 – 2,5 % $\Sigma (C_2H_4, C_2H_6, C_3H_6, C_3H_8)$. На стенках трубопровода наблюдалось незначительное количество сажи, из чего следует возможность ее осаждения в газоотводах доменной печи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ровин С.Л., Ровин Л.Е. Новая концепция рециклинга дисперсных железосодержащих отходов. В кн.: *Труды X Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии»*, Москва, 9–13 ноября 2020 г. Москва: Маска; 2020;238–243.
2. Булатов К.В., Газалеева Г.И. Перспективы развития технологий переработки отходов черной металлургии. В кн.: *Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: труды V Конгресса с международным участием и Конференции молодых ученых «ТЕХНОГЕН-2021»*. Екатеринбург: УрО РАН; 2021:21–33. <https://doi.org/10.34923/technogen-ural.2021.60.16.003>
3. Леонтьев Л., Пономарев В., Шешуков О. Переработка и утилизация техногенных отходов металлургического производства. *Экология и промышленность России*. 2016;20(3):24–27. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-3-24-27>
Leont'ev L., Ponomarev V., Sheshukov O. Recycling and disposal of industrial waste from metallurgical production. *Ecology and Industry of Russia*. 2016;20(3):24–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-3-24-27>
4. Remus M., Monsonet M.A.A., Roudier S., Sancho L.D. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production. Luxembourg: Publications office of the European Union; 2013:627.
5. Yessengaliev D., Mukhametkhan M., Mukhametkhan Ye., Zhabalova G., Kelamanov B., Kolesnikova O., Shyngysbayev B., Aikozova L., Kaskataeva K., Kuatbay Y. Studies of the possibility of improving the quality of iron ores and processing of technogenic composite iron-containing waste of metallurgical production. *Journal of Composites Science*. 2023;7(12):501. <https://doi.org/10.3390/jcs7120501>
6. Furmanski L.M., Muller T.G., Nuernberg J.B., Martins M.A., Arnt Å.B.C., da Rocha M.R., Zaccaron A., Peterson M. Efficient production of ferrous sulfate from steel mill scale waste. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2024;10(3):1783–1794. <https://doi.org/10.1007/s40831-024-00900-8>
7. Hryhoriev S., Petryshchev A., Sinyaeva N., Yurchenko A., Sklyar O., Kvitka S., Borysov V., Vlasuk V., Tsymbal B., Borysova S. Studying the physicochemical properties of alloyed metallurgical waste as secondary resourcesaving raw materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018;4(12(94)):43–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140924>
8. Shatokha V.I., Gogenko O.O., Kripak S.M. Utilising of the oiled rolling mills scale in iron ore sintering process. *Resources, Conservation and Recycling*. 2011;55(4):435–440. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.11.006>
9. Танутров И., Свиридова М. Направления совершенствования способов переработки техногенных отходов Уральского региона. *Экология и промышленность России*. 2015;19(8):31–35. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-8-31-35>
Tanutrov I., Sviridova M. Directions to improve the processing methods of anthropogenic waste of the Ural Region. *Ecology and Industry of Russia*. 2015;19(8):31–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-8-31-35>
10. Танутров И.Н., Свиридова М.Н., Чесноков Ю.А., Маршук Л.А. Технологическое моделирование совместного выщелачивания замасленной прокатной окалины и красного шлама. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020;63(11-12):891–898. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-11-12-891-898>
Tanutrov I.N., Sviridova M.N., Chesnokov Yu.A., Marshuk L.A. Technological modeling of joint leaching of oily rolling scale and red mud. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020;63(11-12):891–898. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-11-12-891-898>
11. Неменов А.М. События в цифрах и фактах. *Металлург*. 2016;(9):108–112.
Nemenov A.M. Events in figures and facts. *Metallurg*. 2016;(9):108–112. (In Russ.).
12. Чесноков Ю.А., Маршук Л.А., Танутров И.Н., Свиридова М.Н. Пирометаллургическая схема совместной переработки красных шламов и прокатной окалины. В кн.: *Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: труды V Конгресса с международным участием и Конференции молодых ученых «ТЕХНОГЕН-2021»*. Екатеринбург: УрО РАН; 2021:415–419.
13. А.с. 1086024 А1 СССР, МПК C22B 1/16. Способ агломерации железорудных материалов / В.И. Ростовский, С.Т. Плискановский, А.И. Иванов, В.Б. Исполатов, В.Д. Гладуш, И.И. Ручкин, А.Г. Жунев, А.Ф. Голубов, Н.А. Короп; заявл. 17.12.1981; опубл. 15.04.1984. Бюл. 14.
14. Пат. 2418079 С2 РФ, МПК C22B 1/16. Способ производства агломерата для доменной плавки / М.А. Гуркин, М.С. Табаков, В.Н. Логинов, Е.А. Кашкаров, В.П. Невраев, А.С. Нестеров, В.Ю. Кучин, Т.В. Деткова, В.С. Якушев; заявл. 06.07.2009; опубл. 10.05.2011. Бюл. 13.

15. А.с. 1407979 А1 СССР, МПК С22В 1/14. Шихта для утилизации замасленной окалины при агломерации / А.А. Готовцев, Ю.Г. Ефименко, А.В. Кабанов, Ю.И. Коваль, И.М. Сальников, Е.Я. Стольберг, Ю.А. Хватов; заявл. 13.05.1986; опубл. 07.07.1988. Бюл. 25.
16. Пат. 2321647 С1 РФ, МПК С22В 1/242, С22В 1/245. Способ брикетирования железосодержащих отходов в виде окалины для плавки / А.И.Ш. Салех, А.М. Грицишин; заявл. 06.07.2006; опубл. 10.04.2008. Бюл. 10.
17. Пат. RU 2131929 С1 РФ, МПК С21В 5/00. Способ получения чугуна с использованием доменного производства на металлургическом предприятии / В.И. Губанов, Р.В. Сейфулов, В.Н. Селиванов, П.И. Черноусов, Ю.С. Юсфин; заявл. 26.06.1998; опубл. 20.06.1999.
18. Пат. 2730304 С1 РФ, МПК F23G 7/05, F23G 5/027. Способ утилизации масло-нефтеосодержащих отходов, замасленной окалины, отходов коксохимического производства / И.Ш. Хуснутдинов, С.И. Хуснутдинов, А.А. Алексеева, В.Ю. Бажин, О.А. Дубовиков, Л.Ш. Иоганн; заявл. 19.03.2019; опубл. 21.08.2020. Бюл. 24.
19. Somova Yu.V., Sviridova T.V., Alekseeva P.A., Nekrov E.A., Schwabecher D. Analysis of methods for processing oily mill scale and oily sludge for iron and steel production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;839:042046.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/4/042046>
20. Савинов А.С., Харченко А.С., Сибгатуллин С.К., Дзюба А.В., Сысоев В.И., Харченко Е.О., Павлов А.В. Прогнозирование температуры замасленной окалины, упакованной в металлический контейнер, при движении в доменной печи от колошника к горну. *Теория и технология металлургического производства*. 2024;(4(51)):24–29.
Savinov A.S., Kharchenko A.S., Sibgatullin S.K., Dzyuba A.V., Sysoev V.I., Kharchenko E.O., Pavlov A.V. Forecasting the temperature of oiled scale packed in a metal container when moving in a blast furnace from the blast-furnace mouth to the iron receiver. *Theory and technology of metallurgical production*. 2024;(4(51)):24–29. (In Russ.).
21. Molgaard J., Smeltzer W.W. Thermal conductivity of magnetite and hematite. *Journal of Applied Physics*. 1971; 42(9):3644–3647.
<https://doi.org/10.1063/1.1660785>
22. Дзюба А.В., Савинов А.С., Харченко А.С., Сибгатуллин С.К., Сысоев В.И., Харченко М.В. Прочностные характеристики контейнеров с замасленной окалиной, изготовленных приближенно к крупности кокса. В кн.: *Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов XII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (ТИМ'2024) с международным участием. Екатеринбург, 16–17 мая 2024 г. Екатеринбург: УрФУ; 2024:37–41.*

Сведения об авторах

Information about the Authors

Александр Сергеевич Харченко, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
ORCID: 0000-0002-0454-6399
E-mail: as.mgtu@mail.ru

Виктор Иванович Сысоев, к.т.н., заведующий лабораторией кафедры металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
ORCID: 0000-0003-3537-7695
E-mail: v.sysoev@magtu.ru

Салават Камилевич Сибгатуллин, д.т.н., профессор кафедры металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
ORCID: 0009-0004-0220-0126
E-mail: 10tks@mail.ru

Андрей Викторович Дзюба, аспирант кафедры металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
ORCID: 0000-0002-7303-8208
E-mail: dzyuba.98@bk.ru

Александр Сергеевич Савинов, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой механики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
ORCID: 0000-0001-7440-5404
E-mail: savinov_nis@mail.ru

Елена Олеговна Харченко, к.т.н., старший преподаватель кафедры металлургии и химических технологий, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
E-mail: eo.mgtu@mail.ru

Aleksandr S. Kharchenko, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University
ORCID: 0000-0002-0454-6399
E-mail: as.mgtu@mail.ru

Victor I. Sysoev, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of the Chair of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University
ORCID: 0000-0003-3537-7695
E-mail: v.sysoev@magtu.ru

Salavat K. Sibgatullin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University
ORCID: 0009-0004-0220-0126
E-mail: 10tks@mail.ru

Andrei V. Dzyuba, Postgraduate of the Chair of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University
ORCID: 0000-0002-7303-8208
E-mail: dzyuba.98@bk.ru

Aleksandr S. Savinov, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair of Mechanics, Nosov Magnitogorsk State Technical University
ORCID: 0000-0001-7440-5404
E-mail: savinov_nis@mail.ru

Elena O. Kharchenko, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Metallurgy and Chemical Technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University
E-mail: eo.mgtu@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. С. Харченко – постановка задачи, анализ результатов исследований, формулирование выводов.

В. И. Сысоев – испытания образцов на газохроматографическом комплексе «Хроматэк Кристалл 5000».

С. К. Сибегатуллин – проведение расчетов, получение результатов, создание рисунков и графиков.

А. В. Дзюба – описание результатов, испытания образцов в вертикальной трубчатой электропечи, критический анализ литературы.

А. С. Савинов – постановка задачи, анализ результатов исследований, формулирование выводов.

Е. О. Харченко – установление рациональной водо-газо-пылевой среды системы газоочистки доменной печи, анализ результатов исследований.

A. S. Kharchenko – problem statement, analysis of research results, formulation of conclusions.

V. I. Sysoev – testing of samples on the gas chromatographic complex “Chromatec Crystal 5000”.

S. K. Sibagatullin – carrying out calculations, obtaining results, obtaining drawings and graphs.

A. V. Dzyuba – description of results, formulation of conclusions, critical analysis of literature.

A. S. Savinov – problem statement, analysis of research results, formulation of conclusions.

E. O. Kharchenko – establishing the rational composition of water, gas, and dust media of blast furnace gas dedusting plant, analysis of research results.

Поступила в редакцию 20.05.2025

После доработки 09.06.2025

Принята к публикации 16.06.2025

Received 20.05.2025

Revised 09.06.2025

Accepted 16.06.2025



УДК 669.168.3:621.365.2

DOI 10.17073/0368-0797-2025-4-339-341



Краткое сообщение

Short Report

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ФЕРРОСПЛАВНОЙ ПЕЧИ ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ МОЩНОСТИ И ДИАМЕТРА ЭЛЕКТРОДОВ

А. П. Шкирмонтов

■ Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Россия, 125167, Москва, Ленинградский пр., 49/2)

✉ aps-panor@yandex.ru

Аннотация. На электролитической модели авторы исследовали работу ферросплавной печи при увеличении диаметра электродов и повышении мощности. В качестве рабочего тела использовали традиционный водный раствор с концентрацией 0,2 % NaCl. Диаметр электродов увеличивали от 30 до 150 мм. Параметры печей мощностью от 7,5 – 10,5 до 81 МВ·А при выплавке ферросилиция соответствуют результатам опытов моделирования, которые были подтверждены при выплавке 45 %-ного ферросилиция в промышленных печах с аналогичными относительными технологическими параметрами. Вид зависимости снижения сопротивления ванны от увеличения диаметра электродов для промышленных ферросплавных печей аналогичен зависимости, полученной в результате опытов по моделированию. Фактор значительного снижения сопротивления ванны от увеличения диаметра электрода для ферросплавных печей различной мощности при выплавке одного сплава имеет весьма существенное значение. При увеличении силы тока электрода снижаются электрический КПД, коэффициент мощности печи и доля активной мощности в ванне технологического процесса. Проведенный анализ параметров печей при выплавке 45 %-ного ферросилиция подтверждает выводы электролитического моделирования ферросплавных печей о значительной роли увеличения диаметра электродов печей в снижении активного сопротивления ванны.

Ключевые слова: ферросплавная печь, модель электропечи, диаметр электрода, распад электродов, активное сопротивление ванны, коэффициент мощности

Для цитирования: Шкирмонтов А.П. Моделирование работы ферросплавной печи при увеличении мощности и диаметров электродов. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2025;68(4):339–341. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-339-341>

MODELING THE OPERATION OF FERROALLOY FURNACE WITH INCREASED POWER AND ELECTRODE DIAMETERS

А. P. Shkirmontov

■ Financial University under the Government of the Russian Federation (49/2 Leningradskii Ave., Moscow 125167, Russian Federation)

✉ aps-panor@yandex.ru

Abstract. Using an electrolytic model, the authors investigated the operation of a ferroalloy furnace with increased electrode diameters and power. A traditional aqueous solution with a concentration of 0.2 % NaCl was used as the working fluid. Diameter of the electrodes was increased from 30 to 150 mm. The parameters of furnaces with a capacity from 7.5 – 10.5 to 81 MV·A during ferrosilicon smelting correspond to the results of simulation experiments, which were confirmed during the smelting of 45 % ferrosilicon in industrial furnaces with similar relative technological parameters. The type of dependence of the decrease in bath resistance on the increase in electrode diameter for industrial ferroalloy furnaces is similar to the dependence obtained as a result of modeling experiments. The factor of a significant decrease in the bath resistance due to an increase in electrode diameter for ferroalloy furnaces of different capacities during the smelting of a single alloy is very significant. With an increase in current strength of the electrode, electrical efficiency, the furnace power factor and the share of active power in the bath decrease. Analysis of the furnace parameters during smelting of 45 % ferrosilicon confirms the conclusions of electrolytic modeling of ferroalloy furnaces about the significant role of increasing the diameter of furnace electrodes in reducing the bath active resistance.

Keywords: ferroalloy furnace, electric furnace models, electrode diameter, electrode decay, active bath resistance, power factor

For citation: Shkirmontov A.P. Modeling the operation of ferroalloy furnace with increased power and electrode diameters. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 2025;68(4):339–341. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-339-341>

ВВЕДЕНИЕ

Исследования параметров на моделях ферросплавных электропечей имеют многолетнюю историю и продолжаются в ряде научных работ по совершенствованию модели дуги в трехфазной печи [1], эффективному распределению тепла в ванне с закрытой дугой [2]. В исследовании [3] рассматривается комплексное моделирование работы электропечи при выплавке ферроникеля. В ряде отечественных работ исследованы: модели плавления шихты в шестиелектродной печи [4]; модели управления печью с поддержанием сопротивления шлаковой ванны [5]; благоприятное распределение тока в многоэлектродной печи [6]. Ряд моделей адекватно отражает реальные процессы, их использование позволяет получать достоверную информацию о параметрах работы электропечей и взаимодействии этих параметров. Широкое распространение получили различные имитационные модели печей, в том числе электролитическое моделирование ванн ферросплавных печей.

Повышение мощности ферросплавных печей сопровождается увеличением диаметра электродов, что приводит к большим капитальным и эксплуатационным затратам, расходу цветных и черных металлов, а также к технологическим сложностям. Например, при повышении мощности печей от 7,5 – 10,5 до 105 МВ·А диаметр самообжигающихся электродов значительно увеличивается: с 900 до 1800 – 2000 мм (в 2,0 – 2,2 раза). Сила тока электрода возрастает с 32 – 37 до 160 кА и более (в 4,3 – 5,0 раз). При этом рабочее напряжение увеличивается не так значительно (со 130 до 230 – 300 В или в 1,8 – 2,3 раза) [7], что лишь косвенно указывает на снижение активного сопротивления ванны печи, коэффициента мощности и приводит к повышенным потерям электроэнергии в короткой сети.

На электролитической модели печи проведены исследования по определению и изменению активного сопротивления ванны (участка электрод – подина) при увеличении диаметров электродов, затем для сопоставления проведен анализ параметров работы промышленных ферросплавных печей различных мощности и диаметров электродов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве рабочего тела модели был выбран традиционный водный раствор с концентрацией 0,2 % NaCl. Исследования проводили по методике, аналогичной методике работы [7]. Диаметр графитированных электродов меняли от 30 до 150 мм. Диаметр проводящей подины модели определялся по выражению $D_{\text{под}} = d_3 + 2a$ (где d_3 – диаметр электрода, мм; a – расстояние от электрода до стенки ванны, мм). Обычно расстояние от электрода до стенки ванны печи в диаметрах электрода составляет $(0,8 \div 1,0)d_3$

(среднее значение – $0,9d_3$). Для всех опытов было принято, что $D_{\text{под}} = 2,8d_3$. Расстояние электрод – подина для выплавки ферросплавов соответствует диапазону $(0,6 \div 0,8)d_3$ [8] (в диаметрах электрода), относительный подэлектродный промежуток (h/d_3) был принят 0,7 диаметра электрода. Заглубление Δh электрода в электролит было равно диаметру электрода.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Переменный ток с частотой 50 Гц через автотрансформатор и разделительный трансформатор подвели к вертикально расположенному электроду и проводящей подине модели печи. На основании замеров силы тока и напряжения определяли сопротивление ванны для каждого диаметра электрода.

Условия моделирования электрических параметров: $\rho = \text{const}$ – удельное электросопротивление ванны модели, Ом·см; $h/d_3 = \text{const}$ – подэлектродный промежуток, в диаметрах электрода; $\Delta h/d_3 = \text{const}$ – заглубление электрода, в диаметрах электрода; $t = \text{const} = 23^\circ\text{C}$ – температура электролита при проведении опытов. Изменение сопротивления ванны модели при увеличении диаметра электродов показано на рисунке, поз. а.

Для сравнения исследовали параметры 43 печей для выплавки ферросилиция (рабочее напряжение, сила тока электрода, коэффициент мощности). Активное сопротивление ванны печи $R_{\text{акт}}$ (мОм) определяли по зависимости

$$R_{\text{акт}} = \frac{U_{\text{раб}} \cos \varphi}{1,73 I_3},$$

где $U_{\text{раб}}$ – рабочее напряжение на ступени трансформатора, В; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности печи; I_3 – сила тока электрода, кА.

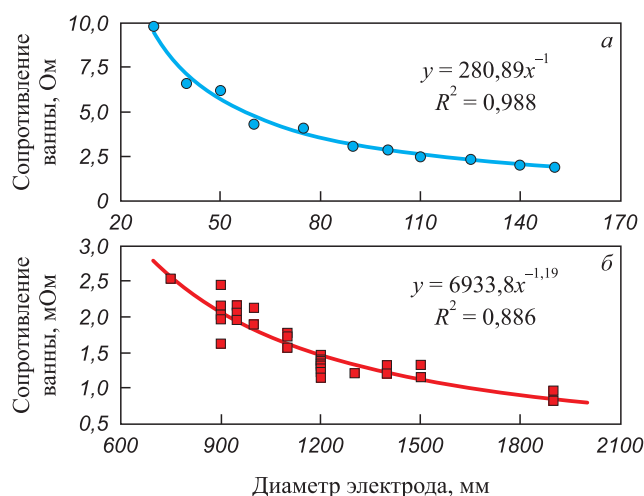
Результаты обработки параметров промышленных печей для выплавки ферросилиция по изменению активного сопротивления ванны с увеличением диаметра электродов приведены на рисунке, поз. б.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Увеличение диаметра электродов на модели ферросплавной печи приводит к значительному снижению сопротивления ванны. Для сравнения полученной зависимости были проанализированы параметры 43 печей. Мощность печных трансформаторов составляла от 7,5 – 10,5 до 81 МВ·А. Диаметр самообжигающихся электродов изменялся от 750 – 900 до 1900 – 2000 мм.

Необходимо отметить, что для промышленных ферросплавных печей зависимость снижения сопротивления ванны от увеличения диаметра электродов аналогична зависимости, полученной в результате опытов по моделированию.

Полученные результаты могут быть использованы как методика для проведения лабораторных работ по



Изменение активного сопротивления ванны при увеличении диаметра электродов на электролитической модели ферросплавной печи (а) и на 43 промышленных печах (б) мощностью 7,5 – 81,0 МВ·А при выплавке 45 %-ного ферросилиция

Change in the bath active resistance with an increase in the electrode diameters on electrolytic model of a ferroalloy furnace (a) and on 43 industrial furnaces (b) with a capacity of 7.5 – 81.0 MV·A during smelting of 45 % ferrosilicon

курсу производства ферросплавов для изучения увеличения мощности печей и диаметров самообжигающихся электродов.

Фактор значительного снижения сопротивления ванны от увеличения диаметра электродов для ферросплавных печей различной мощности при выплавке одного сплава имеет весьма существенное значение. При значительном увеличении силы тока электрода ухудшаются энергетические показатели: снижается электрический КПД, коэффициент мощности печи и доля активной мощности в ванне для технологического процесса выплавки.

Выводы

Проведенный анализ параметров печей при выплавке 45 %-ного ферросилиция подтвердил результаты электролитического моделирования работы ферросплавных печей о значительной роли увеличения диаметра электродов в снижении активного сопротивления ванны. В этом случае требуются использование

углеродистых восстановителей с повышенным удельным электросопротивлением и установка дополнительной компенсации реактивной мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Saevarsdottir G., Larsen H.L., Bakken J.A. Modelling of AC arcs in three-phase submerged arc furnaces. In: *Proceedings of the VII Int. Ferroalloys Congress: INFACON VII. Beijing, China. 7 – 10 June 1998. Beijing; 1998:317–322.*
2. Li J. Discussion of ideal smelting model of submerged-arc furnace. In: *Proceedings of the IX Int. Ferroalloys Congress: INFACON IX. Quebec City, Canada. 3 – 6 June 2001. Quebec City; 2001:121–130.*
3. Oterdoom H., Degel R. Building a FeNi smelter simulator. In: *Proceedings of the XII Int. Ferroalloys Congress: INFACON XII. Helsinki, Finland. 6 – 9 June 2010. Helsinki; 2010:215–227.*
4. Ласточкина М.А. Модель плавления шихты в ванне руднотермической печи. *Записки Горного института. 2002;150:119–123.*
Lastochkina M.A. Model of charge melting in the bath of an ore-thermal furnace. *Zapiski Gornogo instituta. 2002;150:119–123.* (In Russ.).
5. Рябов В.П., Хомяков И.В., Чурсин А.Ю. Разработка модели системы управления руднотермической печью с поддержанием сопротивления шлаковой ванны. *Вестник Московского энергетического института. 2020;(1): 82–88. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2020-1-82-88>*
Ryabov V.P., Khomyakov I.V., Chursin A.Yu. The model of an electric ore smelting furnace control system with maintaining the slag bath resistance. *Bulletin of MPEI. 2020;(1): 82–88.* (In Russ.). <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2020-1-82-88>
6. Ильгачёв А.Н., Михадаров Д.Г. Токи в ванне многоэлектродной установки. *Вестник Чувашского университета. 2023;(4):99–108. <https://doi.org/10.47026/1810-1909-2023-4-99-108>*
Il'gachev A.N., Mikhadarov D.G. Study of the current in the multielectrode plant bath. *Vestnik Chuvashskogo universiteta. 2023;(4):99–108.* (In Russ.). <https://doi.org/10.47026/1810-1909-2023-4-99-108>
7. Shkirmontov A.P. Establishing the theoretical foundations and energy parameters for the production of ferroalloys with a larger-than-normal gap under the electrode. *Metallurgist. 2009;53(5-6):300–308.*
8. Шкирмонтов А.П. Энерготехнологические параметры выплавки ферросплавов в электропечах. Москва: ИД МИСиС; 2018:216.

Сведения об авторе

Александр Прокопьевич Шкирмонтов, д.т.н., директор Центра Редакции научных журналов, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации
E-mail: aps-panor@yandex.ru

Information about the Author

Aleksandr P. Shkirmontov, Dr. Sci. (Eng.), Director of the Editorial Center of Scientific Journals, Financial University under the Government of the Russian Federation
E-mail: aps-panor@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.12.2024
После доработки 27.12.2024
Принята к публикации 05.05.2025

Received 03.12.2024
Revised 27.12.2024
Accepted 05.05.2025



УДК 504.064.38+54-165+544.014

DOI 10.17073/0368-0797-2025-4-342-348



Оригинальная статья

Original article

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИИ

М. В. Васина¹, Л. П. Башенко²

¹ Омский государственный технический университет (Россия, 644050, Омск, пр. Мира, 11)

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

✉ 89609949132@mail.ru

Аннотация. Газовый анализ – один из ключевых методов оценки качества атмосферного воздуха в населенных пунктах, а также в рабочей зоне производств. Особенно необходим мониторинг атмосферного воздуха на объектах, оказывающих значительное негативное воздействие на окружающую среду, в частности, на предприятиях черной металлургии. Особенность газоанализаторов, используемых для системы наблюдения за качеством воздуха, заключается в их чувствительности и селективности. Для достижения данных показателей необходим правильно подобранный чувствительный элемент: преобразователь газоанализатора. В качестве материалов для изготовления преобразователей предлагаются синтезированные твердые растворы полупроводниковых бинарных компонентов, которые зарекомендовали себя как хорошие адсорбенты. В настоящей работе авторы рассмотрели полупроводниковые системы, состоящие из ZnTe и CdSe, условия синтеза твердых растворов на их основе, способы их идентификации, которые позволили аттестовать полученные материалы как твердые растворы замещения с кубической структурой (сфалерита) и гексагональной структурой (вюрцита) (в зависимости от состава). Выполненные рентгенографические, микро-, электронно-микроскопические, ИК-спектроскопические исследования твердых растворов позволили понять структуру поверхности адсорбентов. Результаты исследований химического состава поверхности, кислотно-основных свойств твердых растворов и бинарных компонентов систем позволяют сделать вывод о присутствии на поверхности льюисовских и брэнстедовских кислотных центров, отвечающих за адсорбцию CO на поверхности. В системах ZnTe–CdSe наблюдается тенденция перехода от слабокислой области к относительно повышению основности поверхности с увеличением содержания ZnTe. При помещении материалов в атмосферу CO в такой же зависимости происходит адсорбция газа на поверхности твердых растворов, что подтвердили прямые каталитические исследования. Установленные закономерности изменений с составом объемных и поверхностных свойств позволяют рекомендовать новые полученные материалы в качестве первичных преобразователей сенсоров-датчиков.

Ключевые слова: газоанализатор, угарный газ, полупроводник, новые материалы, твердые растворы, химический состав, поверхностные и объемные свойства, закономерности

Для цитирования: Васина М.В., Башенко Л.П. Перспективные конструкции газоанализаторов для металлургии. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2025;68(4):342–348. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-342-348>

PROMISING DESIGNS OF GAS ANALYZERS FOR METALLURGY

M. V. Vasina¹, L. P. Bashchenko²

¹ Omsk State Technical University (11 Mira Str., Omsk 644050, Russian Federation)

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

✉ 89609949132@mail.ru

Abstract. Gas analysis is one of the key methods for assessing the quality of atmospheric air in populated areas, as well as in the work area of production facilities. Atmospheric air monitoring is especially necessary at facilities that have a significant negative impact on the environment, in particular, at ferrous metallurgy enterprises. The peculiarities of the gas analyzers used for air quality monitoring system are their sensitivity and selectivity. To achieve these indicators, a properly selected sensing element is needed: a gas analyzer converter. Synthesized solid solutions of semiconductor binary components, which proved themselves to be good adsorbents, are proposed as materials for the manufacture of converters. In this paper, the authors examined semiconductor systems consisting of ZnTe and CdSe, conditions for synthesis of the solid solutions based on them, and methods for their identification, which allowed the obtained materials to be certified as solid substitution solutions with cubic sphalerite and hexagonal wurtzite structures (depending on the composition). X-ray, micro-, electron-microscopic, and IR spectroscopic studies of solid solutions made it possible to understand the surface structure of adsorbents. Results of the studies of the surface chemical composition, acid-base properties of solid solutions and binary components of the system allow us to conclude that the Lewis and Brønsted acid centers responsible for CO

adsorption on the surface are present on the surface. In the ZnTe–CdSe systems, there is a tendency to move from a slightly acidic region to a relative increase in the surface basicity with an increase in ZnTe content. When materials are placed in a CO atmosphere, gas adsorption on the surface of solid solutions occurs in the same dependence, which was confirmed by the direct catalytic studies. The established patterns of changes with the composition of bulk and surface properties allow us to recommend new obtained materials as primary converters of sensors.

Keywords: gas analyzer, carbon monoxide, semiconductor, new materials, solid solution, chemical composition, surface and bulk properties, regularities

For citation: Vasina M.V., Bashchenko L.P. Promising designs of gas analyzers for metallurgy. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(4):342–348. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-342-348>

ВВЕДЕНИЕ

Содержание угарного газа в атмосферном воздухе промышленной зоны металлургических предприятий зачастую превышает установленные допустимые нормы, что создает угрозу для здоровья сотрудников предприятий и для окружающей среды в целом. Для контроля качества воздуха используют газоанализаторы, которые за счет объемных и поверхностных свойств чувствительных элементов обладают высокими чувствительностью, оперативностью и избирательностью. Своевременное обнаружение угарного газа на производственной площадке способствует предотвращению аварийных ситуаций, уменьшению ущерба окружающей среде и здоровью персонала.

В качестве чувствительных элементов газоанализаторов используют полупроводниковые материалы, которые зарекомендовали себя как хорошие адсорбенты [1]. Чувствительность таких материалов основана на адсорбции молекул газа на поверхности, образовании областей пространственного заряда и изменении концентрации носителей заряда в приповерхностном слое. На величину адсорбции влияют структурный тип полупроводника, природа и концентрация активных центров на его поверхности и величина удельной поверхности [2]. Фиксация газоанализатором угарного газа из воздушных сред происходит за счет изменения электропроводности чувствительного элемента (сенсорный сигнал) при попадании на него определяемого вещества [3], поэтому выбор материала, используемого в качестве чувствительного элемента, является актуальным. Улучшить адсорбционные способности бинарных компонентов и использовать их в качестве чувствительного элемента (первичного преобразователя) позволяет синтез алмазоподобных полупроводников с получением новых многокомпонентных перспективных материалов (твердых растворов).

Научный и практический интерес представляет исследование ранее не изученных физико-химических свойств твердых растворов на основе ZnTe и CdSe, которые обладают хорошими характеристиками при маленькой стоимости, что дает основание сделать вывод о перспективности применения этих материалов [4]. При определенном соотношении компонентов системы ZnTe–CdSe получают твердые растворы с различными свойствами, и, соответственно, возможно их разнообразное использование.

Целью настоящей работы являются получение и идентификация твердых растворов системы ZnTe–CdSe, определение областей практического применения полученных материалов на основе изученных их физико-химических свойств.

Исходя из актуальности и цели работы, были поставлены следующие задачи:

- получить и аттестовать твердые растворы систем ZnTe–CdSe;
- исследовать физико-химические свойства поверхностностей компонентов систем;
- оценить области практического применения полученных материалов для сенсорной техники как менее дорогостоящих.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемыми объектами являлись тонкодисперсные порошки ($S_{уд} = 0,3 \div 0,91 \text{ м}^2/\text{г}$ – удельная площадь поверхности) бинарных соединений ZnTe, CdSe и твердого раствора на их основе $(\text{ZnTe})_x(\text{CdSe})_{1-x}$, полученного по специально разработанной методике применительно к указанной системе [5]. Заключение о завершении синтеза, получении твердых растворов и их структуре делали по результатам рентгенографических, микро- и электронно-микроскопических, ИК-спектроскопических исследований. Мольные составы полученных твердых растворов сверяли с элементными, найденными на основе SEM-изображений.

Рентгенографические исследования осуществляли на приборе D8 Advance Powder X-Ray фирмы «Bruker» AXS (Германия) в CuK_α -излучении ($\lambda = 0,15406 \text{ нм}$ – длина волны, $T = 293 \text{ К}$ – температура исследований) по методике большеугловых съемок [6; 7] с использованием позиционно-чувствительного детектора Лунхеуе, а также базы данных по порошковой дифракции ICDDIPDF-2 и программы TOPAS 3,0 (Bruker) для расшифровки рентгенограмм (дифрактограмм) и уточнения параметров кристаллических решеток [8] соответственно.

Микроскопические исследования проводили на приборах КН 8700 (Компания Hilox, Япония) и Микромед «Полар-3» с разрешающей способностью до 7000 [9]; электронно-микроскопические – на сканирующем электронном микроскопе JCM–5700, оборудованном приставкой для энергодисперсионного анализа JED-2300 [10].

Кислотно-основные свойства поверхности изучали методами гидролитической адсорбции (определение pH -изоэлектрического состояния) и неводного кондуктометрического титрования [11]. Каталитические исследования проводили безградиентным проточно-циркуляционным методом (в условиях, исключающих влияние процессов массо- и теплопередачи: $T = 298 \div 423$ К; $p = 101,3$ кПа – давление; скорость циркуляции газа-носителя 22 мл/мин; объем импульса 5 мл) с последующим хроматографическим анализом. В качестве газа-носителя применяли аргон.

При использовании метода гидролитической адсорбции находили pH среды, в которой адсорбенты-амфолиты (амфотерные соединения) отщепляют равные (незначительные) количества ионов H^+ и OH^- . В роли таковых выступали $ZnTe$, $CdSe$ и твердые растворы $(ZnTe)_x(CdSe)_{1-x}$ с характерными изоэлектрическими точками, отвечающими минимуму растворимости. По значениям $pH_{изо}$ судили о средней силе и соотношении кислотных и основных центров.

Воспроизводимость и точность экспериментальных данных проверяли по результатам параллельных измерений с использованием методов математической статистики и обработки результатов количественного анализа. Статистическую обработку полученных числовых значений, расчет погрешностей измерений, построение и обработку графических зависимостей проводили с использованием компьютерных программ Stat-2, Microsoft Excel и Origin.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Синтез твердых растворов осуществляли в два этапа: нагрев ампул от 573 до 1273 К и их охлаждение до 725 К [12; 13]. Режим получения твердых растворов представлен в табл. 1.

Результаты рентгенографических исследований свидетельствуют об образовании в полученной системе твердых растворов замещения. Линии на штрих-рентгенограммах твердых растворов сдвинуты относительно линий бинарных компонентов [14]. Теллурид цинка и твердые растворы с его избытком имеют кубическую структуру (сфалерита), селенид кадмия и твердые растворы с избытком $CdSe$ – гексагональную структуру (вюрцита) [15].

Зависимости значений параметров (a , c), объема элементарной ячейки (V_p) кристаллической решетки, межплоскостного расстояния (d_{hkl}), рентгеновской плотности (ρ_r) от состава имеют плавный или линейный характер [16]. По уравнению Шеррера рассчитана область когерентного рассеяния.

Информация о взаимном распределении компонентов получена методом электронной микроскопии на сканирующем электронном микроскопе JCM-5700, снабженном безазотным рентгеновским энергодисперсионным спектрометром.

Таблица 1. Режим получения твердых растворов на основе компонентов системы $ZnTe-CdSe$

Table 1. Mode of obtaining solid solutions based on the $ZnTe-CdSe$ system components

Режим	Температура выдержки, °C	Время выдержки, ч
Нагрев	300	21,0
	500	19,0
	600	10,0
	700	37,0
	800	29,0
	900	20,5
Охлаждение	1000	29,0
	900	50,0
	700	25,0
Итого	500	111,0
		351,5

На рис. 1 представлены SEM изображения порошков бинарных компонентов и твердых растворов изучаемой системы.

На SEM изображениях твердых растворов системы $ZnTe-CdSe$ в режиме фазового контраста на однородном фоне поверхности зерен $ZnTe$ наблюдаются светлые вкрапления $CdSe$ размером менее 5 мкм. Для бинарного компонента $ZnTe$ характерны крупнодисперсные зерна, что наблюдается и в твердых растворах при большем содержании $ZnTe$ (табл. 2).

Величину геометрической удельной поверхности, среднеповерхностный, среднечисленный и средневесовой диаметры частиц, коэффициент полидисперсности (табл. 3) систем рассчитывали по формулам:

$$S = \frac{6 \sum n_i d_i^2}{\rho \sum n_i d_i} = \frac{6}{\rho d_s};$$

$$K = \frac{d_n}{d_q},$$

где S – удельная геометрическая поверхность, m^2/kg ; d_i – средний диаметр частиц фракций; n – число частиц в системе; ρ – рентгеновская плотность частиц; d_s , d_n , d_q – среднеповерхностный, среднечисленный и средневесовой диаметры частиц соответственно; K – коэффициент полидисперсности.

Изучение химического состава методом кондуктометрического титрования позволило сделать вывод о природе кислотных центров, ответственных за адсорбцию газов на поверхность [17], и определить концентрацию кислотных центров на поверхности компонентов системы $ZnTe-CdSe$. Ответственными за кислотные центры выступают: поверхностные атомы с различ-

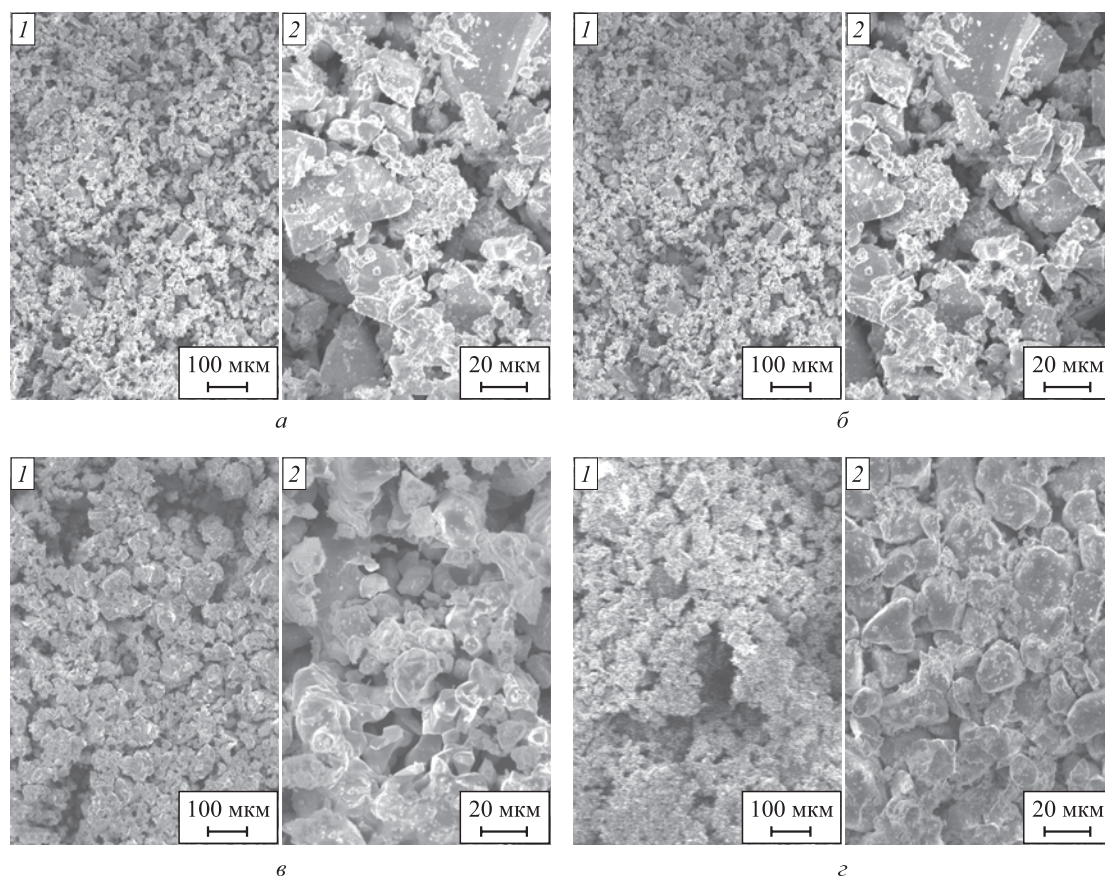


Рис. 1. SEM изображения порошков CdSe (а), $(\text{ZnTe})_{0.26}(\text{CdSe})_{0.74}$ (б), $(\text{ZnTe})_{0.68}(\text{CdSe})_{0.32}$ (в) и ZnTe (г), полученных при разном увеличении (1 – 2)

Fig. 1. SEM images of powders CdSe (a), $(\text{ZnTe})_{0.26}(\text{CdSe})_{0.74}$ (b), $(\text{ZnTe})_{0.68}(\text{CdSe})_{0.32}$ (c) and ZnTe (d) obtained at different magnifications (1 – 2)

ной координационной ненасыщенностью – атомы Cd, Zn (льфовские кислотные центры), а также адсорбированные молекулы воды и группы OH^- (бренстедовские центры) [18]. Подтверждением этого являются результаты измерения pH изоэлектрического состояния и ИК-спектры поверхности [19].

Зависимость общей концентрации кислотных центров имеет экстремальный характер с максимумом при составах $(\text{ZnTe})_{0.26}(\text{CdSe})_{0.74}$ и $(\text{ZnTe})_{0.68}(\text{CdSe})_{0.32}$ (рис. 2). Таким образом, твердые растворы указан-

ных составов обладают наибольшей кислотностью в первом случае, что говорит о высокой адсорбционной способности поверхности $(\text{ZnTe})_{0.26}(\text{CdSe})_{0.74}$ и $(\text{ZnTe})_{0.68}(\text{CdSe})_{0.32}$ по отношению к основным газам.

Повышенную активность поверхности твердых растворов $(\text{ZnTe})_{0.68}(\text{CdSe})_{0.32}$ и $(\text{ZnTe})_{0.26}(\text{CdSe})_{0.74}$ к основным газам подтверждает и изучение кислотно-основных свойств. Значения $pH_{\text{изо}}$ исследуемых полупроводников (табл. 4), экспонированных на воздухе, плавно возрастают с увеличением содержания

Таблица 2. Результаты подсчета частиц микроскопическим анализом

Table 2. Results of particle counting by microscopic analysis

Состав	Количество частиц размерами, мкм										
	5 – 7	10 – 14,5	15 – 17,5	18 – 20	21 – 24	25 – 31	32 – 35	37 – 40	41 – 43	50 – 53	57 – 60
CdSe	2	2	4	3	2	5	–	–	–	–	–
$(\text{ZnTe})_{0.12}(\text{CdSe})_{0.88}$	–	5	2	5	3	6	1	–	–	–	–
$(\text{ZnTe})_{0.26}(\text{CdSe})_{0.74}$	–	4	9	6	4	3	–	–	–	–	–
$(\text{ZnTe})_{0.68}(\text{CdSe})_{0.32}$	–	5	4	2	4	4	–	–	–	–	–
$(\text{ZnTe})_{0.75}(\text{CdSe})_{0.25}$	–	3	2	4	6	4	2	–	–	–	–
ZnTe	–	1	–	–	2	4	–	4	3	1	3

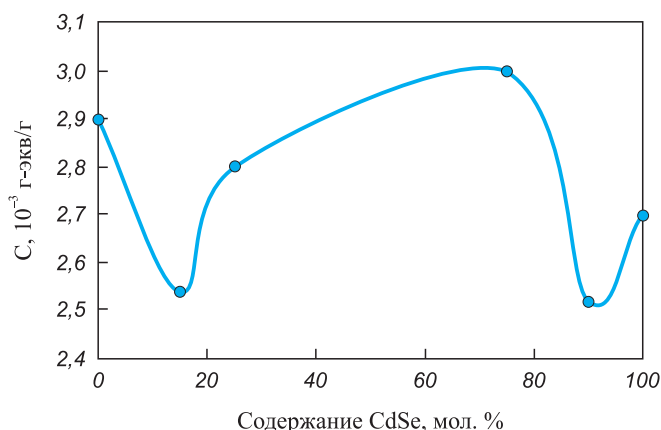


Рис. 2. Зависимость общей концентрации кислотных центров компонентов системы ZnTe–CdSe, экспонированных на воздухе

Fig. 2. Dependence of the total concentration of acidic centers of the ZnTe–CdSe system components exposed to air

ZnTe. При воздействии CO на компоненты системы ZnTe–CdSe появляются экстремумы, отвечающие составам $(\text{ZnTe})_{0,68}(\text{CdSe})_{0,32}$ и $(\text{ZnTe})_{0,26}(\text{CdSe})_{0,74}$, а в целом отмечается смещение значений $pH_{\text{изо}}$ в щелочную область. Это объясняется избыточной электронной плотностью атомов углерода и кислорода и прочной двойной связью между ними. Неподеленные электронные пары CO и свободные орбитали частично гасят на

Таблица 3. Результаты дисперсионного анализа

Table 3. Results of variance analysis

Состав	d_n , мкм	S , м ² /кг	K
CdSe	19,0	47,3	0,76
$(\text{ZnTe})_{0,12}(\text{CdSe})_{0,88}$	14,3	44,4	0,56
$(\text{ZnTe})_{0,26}(\text{CdSe})_{0,74}$	18,3	50,6	0,82
$(\text{ZnTe})_{0,68}(\text{CdSe})_{0,32}$	19,4	46,6	0,81
$(\text{ZnTe})_{0,75}(\text{CdSe})_{0,25}$	17,5	42,6	0,66
ZnTe	38,5	22,9	0,78

Таблица 4. Значения pH изоэлектрического состояния поверхности твердых растворов ZnTe–CdSe (x – мол. доли ZnTe) при экспонировании на воздухе (I) и в атмосфере CO (II)

Table 4. pH values of isoelectric state of the surface of the ZnTe–CdSe solid solutions (x – ZnTe mole fraction) exposed to air (I) and in the CO atmosphere (II)

Условия экспонирования	pH изоэлектрического состояния поверхности твердых растворов ZnTe – CdSe при x					
	0	12	26	68	75	100
I	7,87	7,21	7,15	7,12	7,01	6,84
II	8,35	7,37	7,82	7,75	7,32	7,80

поверхности координационно-ненасыщенные атомы (Zn, Cd), за счет этого и происходит взаимодействие. Подтверждается донорно-акцепторный механизм [20].

Наибольшая разница значений $pH_{\text{изо}}$ у CdSe и твердых растворов, содержащих 26 % ZnTe в CdSe и 68 % ZnTe в CdSe. Эти объекты исследований и рассматривали в качестве чувствительного элемента газоанализатора на угарный газ.

Поведение $pH_{\text{изо}}$ в CO, а также вытекающий из анализа ИК-спектров вывод о повышенной адсорбируемости CO в смеси CO + O₂ [19] позволяют предварительно (до проведения прямых адсорбционных исследований) прогнозировать высокую каталитическую активность твердых растворов $(\text{ZnTe})_{0,26}(\text{CdSe})_{0,74}$ и $(\text{ZnTe})_{0,68}(\text{CdSe})_{0,32}$, что было подтверждено прямыми каталитическими исследованиями, проведенными при одинаковых условиях (рис. 3).

Анализ представленных результатов позволяет говорить о заметном каталитическом превращении CO (χ_{CO}) уже при комнатной температуре: степень превращения CO на компонентах системах состава $(\text{ZnTe})_{0,26}(\text{CdSe})_{0,74}$ составляет 79 %. С повышением температуры значения χ_{CO} преимущественно возрастают, максимальные значения наблюдаются при 373 К.

Сравнение данных о степени превращения каталитического окисления и величины адсорбции CO на полупроводниках показало, что CdSe и твердый раствор $(\text{ZnTe})_{0,26}(\text{CdSe})_{0,74}$ проявляют более высокую каталитическую активность, что согласуется с исследованиями кислотно-основных свойств поверхности, а ZnTe проявляет меньшую каталитическую активность и адсорбционную способность.

Таким образом, из бинарных компонентов ZnTe и CdSe синтезированы твердые растворы замещения.

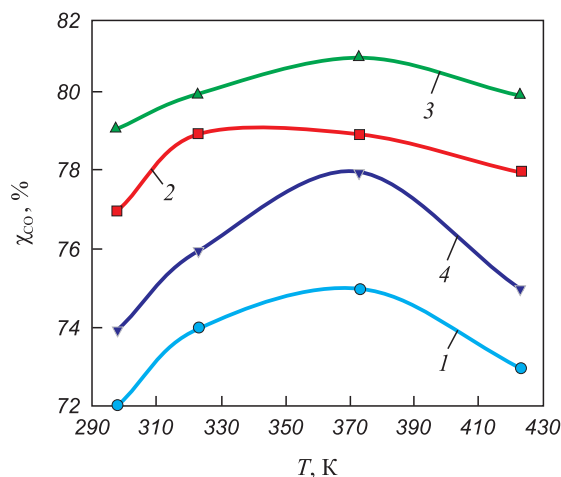


Рис. 3. Зависимости степени превращения (χ_{CO}) от температуры (T) компонентов системы ZnTe–CdSe: ZnTe (1), $(\text{ZnTe})_{0,68}(\text{CdSe})_{0,32}$ (2), $(\text{ZnTe})_{0,26}(\text{CdSe})_{0,74}$ (3), CdSe (4)

Fig. 3. Dependence of transformation degree (χ_{CO}) on temperature (T) of the ZnTe–CdSe system components: ZnTe (1), $(\text{ZnTe})_{0,68}(\text{CdSe})_{0,32}$ (2), $(\text{ZnTe})_{0,26}(\text{CdSe})_{0,74}$ (3), CdSe (4)

Полученные твердые растворы имеют кубическую структуру с избытком теллурида цинка и гексагональную структуру с избытком селенида кадмия. Исследования твердых растворов методом электронной микроскопии подтвердили мольный и элементный состав образцов.

Для образцов $(\text{ZnTe})_{0,26}(\text{CdSe})_{0,74}$ и $(\text{ZnTe})_{0,68}(\text{CdSe})_{0,32}$ удельная поверхность наибольшая. Такая же закономерность по данным образцам прослеживается при изучении природы активных центров поверхности твердых растворов при экспонировании на воздухе и в атмосфере СО методом гидролитической адсорбции, неводного кондуктометрического титрования, что говорит об активной поверхности этих растворов по отношению к угарному газу. Повышенную адсорбируемость в СО и смеси СО + О₂ подтверждают и ИК-спектры.

Выводы

Изучение реакции каталитического окисления СО на образцах системы ZnTe–CdSe предварительно помогло установить температурные области протекания реакции и наиболее каталитически активные компоненты изучаемой системы. Каталитические исследования подтвердили активность твердых растворов $(\text{ZnTe})_{0,26}(\text{CdSe})_{0,74}$ и $(\text{ZnTe})_{0,68}(\text{CdSe})_{0,32}$, что позволяет рекомендовать их к использованию в диагностике окружающей среды для определения угарного газа в рабочей зоне металлургических предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Fang X., Zhai T., Gautam U.K., Li L., Wu L., Bando Y., Golberg D. ZnS nanostructures: From synthesis to applications. *Progress in Materials Science*. 2011;56(2):175–287. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2010.10.001>
- Kirovskaya I.A., Nor P.E., Ekkert A.O., Ekkert R.V., Chernous N.V. New materials based on the systems InP–CdTe and CdS–CdTe; Their comparative properties. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2023;14(4):1075–1081. <https://doi.org/10.1134/s2075113323040214>
- Peter Y.Yu., Cardona M. Fundamentals of Semiconductors. Physics and Material Properties. Springer; 2010:775. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-00710-1>
- Kirovskaya I.A., Nor P.E., Bukashkina T.L., Mironova E.V. Surface properties of semiconductor analogs of CdBi^{VI} and their solid substitution solutions. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2016;90(3):522–529. <https://doi.org/10.1134/S0036024416030213>
- Кировская И.А. Физико-химические свойства бинарных и многокомпонентных алмазоподобных полупроводников. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2015:368.
- Смыслов Е.Ф. Экспрессный рентгеновский метод определения периода решетки нанокристаллических материалов. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2006;72(5):33–34.
- Smyslov E.F. Express X-ray method for determining the lattice period of nanocrystalline materials. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2006;72(5):33–34. (In Russ.).
- Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электроннооптический анализ. Москва: Металлургия; 1970:366.
- Федяева О.А., Васина М.В., Пошелюжная Е.Г. Рентгеновские и электронно-микроскопические исследования системы ZnTe–CdSe. *Журнал неорганической химии*. 2014;59(2):172–175. <https://doi.org/10.7868/S0044457X14020068>
- Fedyeva O.A., Vasina M.V., Poshelyuzhnaya E.G. X-ray powder diffraction and electron microscopic studies of the ZnTe–CdSe system. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2014;59(2):172–175. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0044457X14020068>
- Кларк Э.Р., Эберхардт К.Н. Микроскопические методы исследования материалов. Москва: Техносфера; 2007:375.
- Сканирующая электронная микроскопия и рентгено-спектральный микроанализ в примерах практического применения / М.М. Криштал, И.С. Ясников, В.И. Полунин. Москва: Техносфера; 2009:206.
- Кировская И.А. Катализ. Полупроводниковые катализаторы. Омск: Изд-во ОмГТУ; 2004:272.
- Charbonnier M., Murat M. Sur la détermination des diagrammes de phases à température ambiante des sulfures mixtes appartenant aux systèmes Zn–Cd–S, Zn–Hg–S, Cd–Hg–S. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. 1974;278(4):259–261. (In French).
- Cherin P., Lind E.L., Davis E.A. The preparation and crystallography of cadmium zinc sulfide solid solutions. *Journal of the Electrochemical Society*. 1970;117(2):233–236.
- Кировская И.А., Васина М.В. Структура и кислотно-основные свойства поверхности полупроводников системы ZnTe–CdSe. *Журнал физической химии*. 2014;88(10):1569–1576. <https://doi.org/10.7868/S0044453714100227>
- Kirovskaya I.A., Vasina M.V. Structure and acid-base properties of the surface of semiconductors of the ZnTe–CdSe system. *Zhurnal fizicheskoi khimii*. 2014;88(10):1569–1576. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0044453714100227>
- Čapek R.K., Moreels I., Lambert K., De Muynck D., Zhao Q., Tomme A.V., Vanhaecke F., Hens Z. Optical properties of zincblende cadmium selenide quantum dots. *Journal of Physical Chemistry C*. 2010;114(14):6371–6376. <https://doi.org/10.1021/jp1001989>
- Goldstein J.I., Newbury D.E., Echlin P., Joy D.C., Lyman C.E., Lifshin E., Sawyer L., Michael J.R. Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. New York: Plenum Press; 2003:708. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0215-9>
- Kirovskaya I.A., Ekkert R.V., Umansky I.Yu., Ekkert A.O., Kropotin O.V. Comparison of the bulk and surface properties of InB^V–ZnS semiconductor solid solutions. *Semiconductors*. 2020;54(11):1459–1466. <https://doi.org/10.1134/S1063782620110147>
- Кировская И.А., Васина М.В., Миронова Е.В., Бруева О.Ю., Эккерт А.О., Жигарова О.Ю. Относительное влияние бинарных компонентов на объемные и поверхностные свойства твердых растворов систем GaAs–CdSe и ZnTe–CdSe. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2021;(4):12–18. <https://doi.org/10.31857/S1028096021040051>

Kirovskaya I.A., Vasina M.V., Mironova E.V., Brueva O.Yu., Ekkert A.O., Zhigarova O.Yu. Relative influence of binary components on the bulk and surface properties of GaAs–CdSe and ZnTe–CdSe solid solutions. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2021;15(2): 321–326. (In Russ.).

<https://doi.org/10.1134/S1027451021020233>

19. Кировская И.А., Васина М.В., Юрьева А.В., Шалаева М.Е., Еремин Е.Н., Матяш Ю.И., Корнеев С.А. Химический состав и кислотно-основные свойства поверх-

ности твердых растворов $(\text{ZnTe})_x(\text{CdSe})_{1-x}$. *Омский научный вестник*. 2014;(1(127)):32–37.

Kirovskaya I.A., Vasina M.V., Yuryeva A.V., Shalaeva M.E., Eremin E.N., Matyash Yu.I., Korneev S.A. Chemical composition and acid-base surface properties of solid solutions $(\text{ZnTe})_x(\text{CdSe})_{1-x}$. *Omsk Scientific Bulletin*. 2014;(1(127)):32–37. (In Russ.).

20. Aven M. Mobility of holes and interaction between acceptor defects in ZnTe. *Journal of Applied Physics*. 1967; 38(11):4421–4430. <https://doi.org/10.1063/1.1709141>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Марина Владимировна Васина, к.х.н., доцент кафедры «Промышленная экология и безопасность», Омский государственный технический университет

ORCID: 0000-0003-0236-8151

E-mail: 896099949132@mail.ru

Людмила Петровна Бащенко, к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-1878-909X

E-mail: luda.baschenko@gmail.com

Marina V. Vasina, Cand. Sci. (Chem.), Assist. Prof. of the Chair of Industrial Ecology and Safety, Omsk State Technical University

ORCID: 0000-0003-0236-8151

E-mail: 896099949132@mail.ru

Lyudmila P. Bashchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Thermal Power and Ecology", Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-1878-909X

E-mail: luda.baschenko@gmail.com

Поступила в редакцию 18.04.2025

После доработки 16.05.2025

Принята к публикации 21.05.2025

Received 18.04.2025

Revised 16.05.2025

Accepted 21.05.2025



УДК 669.017.15

DOI 10.17073/0368-0797-2025-4-349-356



Оригинальная статья
Original article

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ БЫСТРОРЕЖУЩИХ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СТАЛЕЙ

В. Е. Громов[✉], С. С. Миненко, А. С. Чапайкин,
А. П. Семин, Ю. А. Шлярова

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

✉ gromov@physics.sibsiu.ru

Аннотация. Созданный в начале XXI века новый класс материалов – высокоэнтروпийные сплавы – привлекает внимание исследователей в области физического материаловедения. На основе анализа литературных данных последних лет рассмотрено современное состояние проблемы создания и исследования средне- и высокоэнтропийных быстрорежущих сталей. Благодаря твердорастворному упрочнению и упрочнению нановыделениями на основе средне- и высокоэнтропийных сплавов сложного состава возможно создание быстрорежущих сталей с высокими твердостью, термической стойкостью и ударной вязкостью. Приведенные результаты исследований трибологических характеристик и микротвердости быстрорежущих сталей свидетельствуют о зависимости этих характеристик от энтропии. Наименьшие значения сил резания и контактных температур характерны для режущего инструмента из быстрорежущей стали с высоким уровнем энтропии. Таким образом, при разработке новых быстрорежущих марок предпочтение следует отдавать составам с высоким уровнем энтропии, поскольку они обеспечивают лучшие трибологические характеристики и более высокую износостойкость. Методами современного физического материаловедения изучено структурно-фазовое состояние наплавки в среде азота высокоэнтропийной быстрорежущей молибденовой стали неэквивалентного состава на среднеуглеродистую сталь. Методами рентгеноспектрального анализа определен элементный состав поверхностного слоя наплавки, а рентгенофазным анализом установлено, что твердые растворы на основе α -железа (88 мас. %) и γ -железа (12 мас. %) являются основными фазами материала наплавленного слоя. Проведенный расчет конфигурационной энтропии данной быстрорежущей высокоэнтропийной стали дает значение $1,93R$ (где R – универсальная газовая постоянная). Сделан вывод об актуальности и перспективах разработки и исследования высокоэнтропийных сплавов.

Ключевые слова: высокоэнтропийная быстрорежущая сталь, трибологические свойства, структура, фазовый состав, карбидная фаза, механизмы упрочнения

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-19-00186, <https://rscf.ru/project/23-19-00186>.

Для цитирования: Громов В.Е., Миненко С.С., Чапайкин А.С., Семин А.П., Шлярова Ю.А. Перспективы создания быстрорежущих высокоэнтропийных сталей. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(4):349–356. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-349-356>

PROSPECTS FOR CREATION OF HIGH-SPEED HIGH-ENTROPY STEELS

V. E. Gromov[✉], S. S. Minenko, A. S. Chapaikin,
A. P. Semin, Yu. A. Shlyarova

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

✉ gromov@physics.sibsiu.ru

Abstract. A new class of materials created at the beginning of the 21st century – high-entropy alloys – attracts the attention of researchers in the field of physical materials science. Based on the analysis of recent literature data, the current state of the problem of creating and researching medium- and high-entropy high-speed steels is considered. Due to solid-solution hardening and nano-precipitation hardening based on medium- and high-entropy alloys of complex composition, it is possible to create high-speed steels with high hardness, thermal resistance and impact strength. The presented results of studies of tribological characteristics and microhardness of high-speed steels indicate the dependence of these characteristics on entropy. The lowest values of cutting forces and contact temperatures are typical for cutting tools made of high-speed steel with a high level of entropy. Thus, when developing new high-speed grades, preference should be given to the compositions with a high level of entropy, since they provide better tribological characteristics and higher wear resistance. The structural and phase state of surfacing of high-entropy high-speed molybdenum steel

of non-equiatom composition on medium-carbon steel in a nitrogen medium was studied by the methods of modern physical materials science. X-ray spectral analysis methods determined the elemental composition of surfacing outer layer, and X-ray phase analysis revealed that solid solutions based on α -iron (88 wt. %) and γ -iron (12 wt. %) are the main phases of the deposited layer material. The calculation of the configuration entropy of this high-speed high-entropy steel gives a value of $1.93R$ (where R is the universal gas constant). The conclusion is made about the relevance and prospects of the development and research of high-energy alloys.

Keywords: high-entropy high-speed steel, tribological properties, structure, phase composition, carbide phase, hardening mechanisms

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-19-00186, <https://rscf.ru/project/23-19-00186>.

For citation: Gromov V.E., Minenko S.S., Chapaikin A.S., Semin A.P., Shlyarova Yu.A. Prospects for creation of high-speed high-entropy steels. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(4):349–356. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-349-356>

ВВЕДЕНИЕ

Создание в начале XX столетия нового класса материалов – высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) и соединений – ознаменовало значительный шаг в развитии металлических материалов [1; 2]. Полученные оригинальные результаты в области изучения структурно-фазовых состояний и свойств широкого класса ВЭС обобщены в работах [3; 4], аналитических обзорах и монографиях [5 – 8]. Чуть позже появились сообщения о высокоэнтропийных карбидах, боридах, нитридах, силицидах, тонких пленках и покрытиях, получаемых при магнетронном распылении. Количество полученных к настоящему времени ВЭС и соединений огромно, и оно неуклонно растет. Предсказать составы и свойства ВЭС можно с помощью термодинамических расчетов при использовании пакета программ CALPHAD [9]. Однако, какими бы ни были методы расчета получения ВЭС, лишь информация о структурно-фазовых состояниях и свойствах полученных материалов может дать ответ об областях их потенциального применения. Например, ряд ВЭС с высокими прочностью и пластичностью при пониженных и даже криогенных температурах привлекательны и перспективны при использовании в условиях Арктики и Антарктики [9 – 11]. Анализ последних публикаций по физическому материаловедению, физике конденсированного состояния, металловедению и термообработке свидетельствует о том, что разрабатываются и исследуются все типы ВЭС, которые имеют прикладное значение: конструкционные, крио- и жаропрочные, коррозионно-, радиационно- и износостойкие, с особыми магнитными и электрическими свойствами и т. д. Особый интерес представляют высоко- и среднеэнтропийные быстрорежущие стали [12; 13]. Однако количество публикаций по этой теме очень ограничено.

Быстрорежущие стали – это разновидность высокоуглеродистых мартенситных сталей, содержащих сильные карбидообразующие элементы (в основном вольфрам, молибден, ванадий и др.). За прошедшее столетие с момента создания быстрорежущей стали марки P18 для конкретных задач металлообрабатывающей, машиностроительной и металлургической отраслей промышленности были разработаны вольфрам-молибденовые стали марок P6M5, P7M4K5 и др.

Дальнейшее направление в создании новых марок быстрорежущих сталей связано с заменой дефицитного и дорогого вольфрама на молибден. Обоснованность такой замены обусловлена тем, что молибден и вольфрам расположены в одной группе и соседних периодах Периодической таблицы элементов Д.И. Менделеева, что предполагает достаточно похожее их влияние на структуру и свойства быстрорежущих сталей.

В последние годы внимание исследователей и практиков привлечено к идее создания на основе высокоэнтропийных (ВЭС) и среднеэнтропийных сплавов (СЭС) сложного состава быстрорежущих сталей с высокими твердостью, термической стойкостью и ударной вязкостью, благодаря твердорастворному упрочнению и упрочнению нановыделениями [4; 14; 15]. В работе [15] предложена инновационная стратегия проектирования ВЭС путем внедрения пластичных многокомпонентных интерметаллических наночастиц повышенной плотности, обеспечивающих прочность до 1,5 ГПа и пластичность 50 %. Введение легирующих элементов (алюминия, меди, кобальта, никеля и др.) в эквиатомном соотношении увеличивает конфигурационную энтропию сплава и улучшает его свойства [16]. В работе [16] проведен сравнительный анализ свойств нового быстрорежущего СЭС $\text{Fe}_x(\text{Al}, \text{Co}, \text{Cr}, \text{Cu}, \text{Ni})_{88,05} \text{Mo}_5 \text{N}_6 \text{C}_{0,95}$. Показано, что разработанный СЭС этого состава демонстрирует более высокую твердость после закалки и отпуска по сравнению с традиционной быстрорежущей сталью марки P6M5. Улучшение свойств после отпуска объясняется высоким легированием сплава, которое способствует твердорастворному упрочнению в мартенситной матрице и дисперсионному упрочнению. Кроме того, преобразование карбидов типа Me_2C в высокотвердый MeC также выгодно для компенсации потери твердости, вызванной уменьшением общего количества карбидов.

Исследования ВЭС и СЭС при создании быстрорежущих сталей являются перспективными и с точки зрения стоимости составляющих компонентов (недорогие элементы, в данном случае железо). При наличии в сплаве трех и более элементов в эквиатомном соотношении конфигурационная энтропия увеличивается. Для СЭС конфигурационная энтропия составляет порядка $(1,0 \div 1,5)R$ (где R – универсальная газовая постоянная) [17 – 24]. В работе [25] методом лазерной

наплавки получено покрытие СЭС быстрорежущей стали состава $\text{Fe}_{68}(\text{Al}, \text{Co}, \text{Cr}, \text{Cu}, \text{Mo}, \text{Ni}, \text{V}, \text{W})_{32}$. Покрытия характеризуются твердой мартенситной матрицей со вторичным упрочнением и наличием когерентных наноразмерных карбидов Me_2C . Большое содержание легирующих элементов обеспечивает отличное сопротивление износу и окислению без образования различных выделений и грубых карбидов. Введение алюминия и кобальта улучшает прочность и усиливает вторичное упрочнение [26; 27], а медь может образовывать наноразмерные частицы карбидов для достижения желаемого результата сочетания прочности и ударной вязкости [28]. Именно добавки хрома, кобальта, алюминия и других антиоксидантных элементов обеспечивают более низкие значения термического износа по сравнению с наплавкой традиционной быстрорежущей стали марки Р6М5, при этом микроструктура СЭС покрытия не отличается от традиционной (при использовании быстрорежущей стали): мартенситная матрица и карбидный каркас [25].

Оптимизированное распределение карбидов путем легирования и термообработки и высокая твердость делают быстрорежущие СЭС и ВЭС перспективными для промышленного применения. Во-первых, в традиционной быстрорежущей стали повышение твердости может быть достигнуто только увеличением содержания углерода, что приведет к образованию первичного карбидного каркаса и, следовательно, к снижению ударной вязкости. Во-вторых, высокие твердость и хрупкость традиционной быстрорежущей стали после закалки приводят к ухудшению условий для механической обработки. Для быстрорежущих СЭС и ВЭС значительное упрочнение после отпуска может привести к пониженной твердости после закалки, что обеспечивает качество механической обработки.

Комплекс программ термодинамических расчетов CALPHAD (*Calculation Phase Diagram*) позволяет спрогнозировать фазовый состав ВЭС, что было сделано в работах [29 – 32]. Однако сама по себе эта задача представляется достаточно сложной ввиду неполного описания, в частности, тройных систем [29].

Авторами работ [12; 13; 33] установлена количественная связь энтропии быстрорежущих сталей с их трибологическими характеристиками в условиях сухого трения о конструкционную и нержавеющую стали. Делая акцент на практических результатах исследований, авторы пользуются представлениями о «тепловой» энтропии. Скорее всего речь идет о вибрационном вкладе (кроме конфигурационного и электронного) в энтропию смешения [34]. Согласно результатам работы [34], термодинамическая характеристика «энтропия смешения» является важным параметром предсказания фазовой стабильности ВЭС. На основе расчетов теории функционала плотности авторы работы [34] выяснили вклады колебательной, конфигурационной и электронной энтропий. Учет энтропий-

ных вкладов имеет решающее значение при разработке теоретических основ при вычислительном прогнозировании стабильных ВЭС.

Возможность априорного прогнозирования некоторых эксплуатационных характеристик экспериментальных составов инструментальных режущих материалов обеспечивается изучением термодинамических аспектов процессов изнашивания при трении (резании). Одним из важнейших факторов, влияющих на срок службы инструмента, является его износостойкость, во многом определяемая трибологическими свойствами. Значительного снижения интенсивности изнашивания при трении и резании можно добиться путем обеспечения термодинамического состояния, характеризующегося минимальной плотностью накопленной тепловой энтропии, за счет использования материалов с высокими значениями энтропии. Высокоэнтропийные быстрорежущие стали, используемые для резания, характеризуются низкими абсолютными (относительными) термо-ЭДС, что повышает устойчивость сталей к газовой коррозии. Тепловая энтропия, как и абсолютная (относительная) термо-ЭДС материалов, зависит от их химического состава и может использоваться как его интегральная характеристика. Термическую энтропию S , как и все термодинамические потенциалы, можно рассчитать по правилу аддитивности при известном химическом составе материала (табл. 1). В работе [12] экспериментально подтверждена связь энтропии быстрорежущей стали с трибологическими свойствами и упруго-прочностными характеристиками поверхностных слоев.

Исследования конструкционной стали 30ХГСА показали, что с увеличением энтропии микротвердость поверхностных слоев и модуль микроупругости быстрорежущей стали растут, а коэффициент трения падает (при скорости 1 м/с).

Анализ изменения силы трения в установившейся фазе процесса позволяет судить о снижении адгезионной силовой составляющей трения для быстрорежущих сталей с высоким уровнем энтропии за счет низкой интенсивности образования адгезионных соединений и малых значений их прочности на сдвиг, что приводит к снижению коэффициента трения.

Склонность материалов к образованию адгезионных соединений (сварных мостиков) можно объяснить поверхностными свойствами быстрорежущих сталей с низкой энтропией, например, марок Р6М3, Р6М5 (рис. 1): чем меньше твердость материала и выше пластичность, тем быстрее происходит разрушение защитной поверхностной пленки и адгезионных соединений.

Установлено, что лучшие значения характеристик трения связаны с высоким уровнем энтропии, что, по-видимому, можно объяснить особенностями формирования третьего тела (наростка) и его состава. Процесс роста третьего тела для высокоэнтропийной быстрорежущей стали протекает с большей скоростью, чем

Таблица 1. Состав и термическая энтропия быстрорежущих сталей [12; 13]

Table 1. Composition and thermal entropy of high-speed steels [12; 13]

Сталь	S , Дж/(моль·К)	Состав
P6M3	26,86	W (6 %) + Mo (3 %) + Fe
P6M5	27,26	W (6 %) + Mo (5 %) + Fe
P6M4Ф4	27,46	W (6 %) + Mo (4 %) + V (4 %) + Fe
P8M3Ф4	27,53	W (8 %) + Mo (3 %) + V (4 %) + Fe
P18	28,04	W (18 %) + Fe
ЭП658	30,60	W (6 %) + V (2 %) + Co (8 %) + Mo (5 %) + Fe
ЭП657	30,78	W (12 %) + V (2 %) + Co (8 %) + Mo (3 %) + Fe

его разрушение, а получаемая толщина третьего тела способствует отчуждению поверхностей трения, снижая прочность образовавшегося соединения и коэффициент трения. Эти свойства проявляются в условиях, когда величина термомеханических активирующих воздействий в зоне трения достаточна. Установлено, что наплавочные слои на образцах из высокоэнтропийной быстрорежущей стали обладают большей стабильностью за счет высокой твердости и низкой пластичности поверхностных слоев. Авторами работы [12] рассмотрен процесс формирования нароста при трении для быстрорежущих сталей с различными уровнями энтропии, характеризующийся в первом приближении двумя количественными показателями: максимально возможным значением толщины нароста при заданных условиях и относительной скоростью нароста. Показано, что расчет значений энтропии как структурно-чувствительной характеристики инструментальных материалов может быть использован для априорного прогнозирования трибологических свойств существующих и новых разрабатываемых марок быстрорежущей стали.

Исследования трибологических характеристик стандартных марок быстрорежущих сталей в условиях трения по нержавеющей стали 12X18H9Т без применения смазки показали, что фрикционное взаимодействие высокоэнтропийных быстрорежущих сталей характеризуется увеличением толщины слоя, занятого диссипативными структурами, с течением времени [13]. Образующийся промежуточный слой оказывает экранирующее действие, предохраняя поверхности трущихся тел от разрушения, но в то же время обладает большим сопротивлением сдвигу, благодаря чему зафиксированы более высокие коэффициенты трения. Процесс трения быстрорежущих сталей с низкими значениями тепловой энтропии характеризуется сближением контактирующих тел во времени. Для этой группы материалов зафиксированы более низкие коэффициенты трения на фоне значительного изменения микрорельефа поверхности относительно исходного состояния.

Работа [33] посвящена актуальной проблеме исследования зависимостей температуры и сил резания от энтропии быстрорежущих сталей. Высокая износостойкость режущего инструмента тесно связана с энтропией инструментальных материалов. Однако связи энтропии как структурно-чувствительной характеристики с температурой и силами во время процессов механической обработки плохо изучены. Основным каналом диссипации энергии в зоне резания в процессе механической обработки является тепловой, а количественную оценку интенсивности этих процессов можно дать путем оценки значений температуры. На температуру влияют нагрузочно-скоростные параметры процесса резания (скорость резания, глубина, подача), наиболее значимым из которых является скорость резания. Именно термический фактор, существенно зависящий от сил резания, способствует увеличению скорости изнашивания, а также ограничивает величину скорости резания при достижении жаростойкости инструментального материала.

В результате изучения тех же быстрорежущих высокоэнтропийных сталей (табл. 1) экспериментально установлено, что при всех скоростях резания в исследуемом диапазоне наименьшие значения сил резания

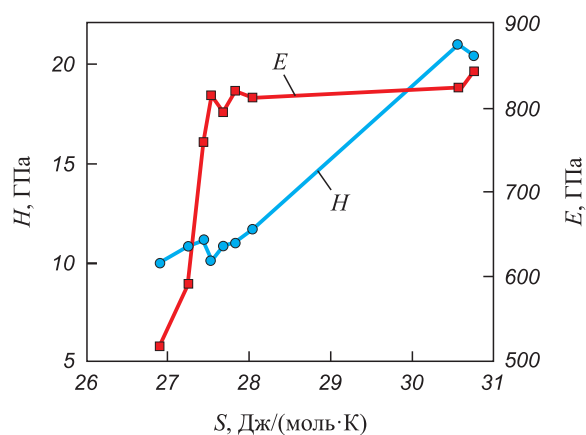


Рис. 1. Зависимость микротвердости (H) и модуля микроупругости (E) поверхностных слоев от энтропии быстрорежущей стали [12; 13]

Fig. 1. Dependence of microhardness (H) and microelastic modulus (E) of surface layers on entropy of high-speed steel [12; 13]

и контактных температур характерны для режущего инструмента из быстрорежущей стали с высоким уровнем тепловой энтропии. Таким образом, при разработке новых быстрорежущих сталей предпочтение следует отдавать составам, которые характеризуются высоким уровнем тепловой энтропии, поскольку они обеспечивают лучшие трибологические характеристики и более высокую износостойкость при потенциально более высоких значениях скорости резания и производительности в процессе обработки по сравнению с низкоэнтропийными материалами.

В последние годы активно проводятся научные и практические исследования в области ресурсосберегающих и энергоэффективных технологий плазменной и электродуговой наплавки высокой твердости быстрорежущими сталями [35; 36]. Использование при этом азота в качестве легирующего элемента позволяет существенно повысить износостойкость, прочность, коррозионную и ударостойкость, что обеспечивается повышением микротвердости структурных составляющих покрытий за счет формирования карбонитридов. Электродуговая наплавка в защитно-легирующей среде азота с токоведущей присадочной порошковой проволокой обладает значительными преимуществами перед другими способами наплавки [35; 36].

Однако в зарубежной и отечественной литературе крайне ограничено количество исследований, проведенных методами современного физического материаловедения, которые посвящены установлению природы формирования повышенных функциональных свойств наплавки быстрорежущих сталей типа M10. Это препятствует их широкому практическому использованию.

Целью настоящей работы является исследование методами современного физического материаловедения структуры, элементного и фазового составов наплавки высокоэнтропийной быстрорежущей стали типа M10 неэквивалентного состава.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы для исследований получали плазменной наплавкой в среде азота токоведущей порошковой проволокой на сталь 30ХГСА. Химический состав стали 30ХГСА, мас. %: С 0,3; Cr 0,9; Mn 0,8; Si 0,9, остальное – железо. Содержание элементов в наплавке M10, мас. %: Mo 11,87; Cr 4,24; Co 3,48; V 1,77; Si 0,94; Mn 0,50. В качестве защитного газа использовали технический азот (ГОСТ 9293 – 74) с расходом 20 – 22 л/мин. Режим наплавки быстрорежущей стали M10 на сталь 30ХГСА на установке УД-417: сварочный ток 140 – 160 А; напряжение на дуге 50 – 55 В; скорость наплавки 15 – 18 м/ч; длина дуги 20 мм. Наплавку проводили в четыре слоя общей толщиной 9 мм.

Исследования структуры и элементного состава наплавленного слоя осуществляли на сканирующем электронном микроскопе КУКУ-ЕМ6900 с термо-

эмиссионным вольфрамовым катодом и приставкой для микрорентгеноспектрального анализа элементного состава. Исследования фазового состава и структурных параметров наплавленного слоя проводили на дифрактометре XRD-6000 на CuK_α -излучении. Анализ фазового состава проведен с использованием баз данных PDF 4+, а также программы полнопрофильного анализа PowderCell 2.4.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования травленного шлифа слоя, полученного наплавкой на сталь 30ХГСА в среде азота токоведущей порошковой проволокой M9Ю, выявили формирование поликристаллической структуры дендритного типа, характерное изображение которой приведено на рис. 2.

Элементный состав поверхностного слоя наплавки, выявленный методами микрорентгеноспектрального анализа (рис. 2, табл. 2), показал наличие химических элементов, соответствующих паспортному составу данного сплава.

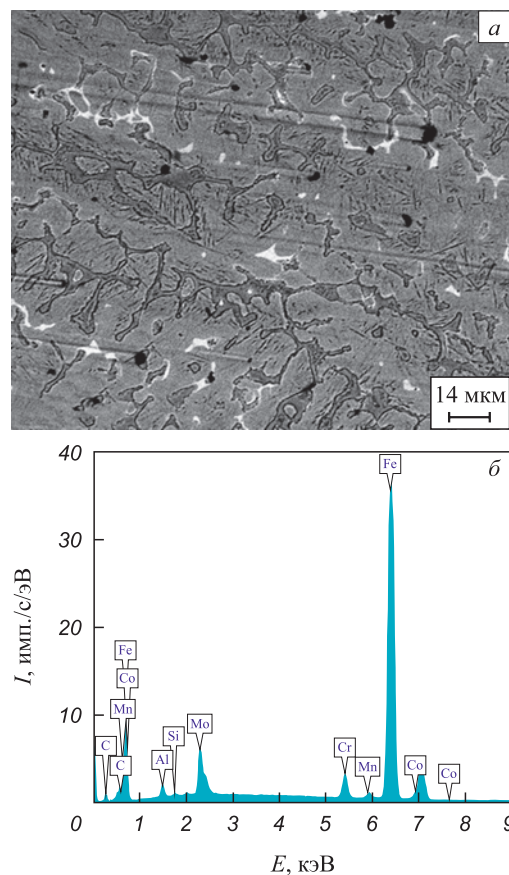


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение структуры наплавленного слоя после полировки и травления (а) и энергетические спектры (б), полученные с участка наплавки, изображенного на поз. а

Fig. 2. Electron microscopic image of structure of the deposited layer after polishing and etching (a) and energy spectra (b) obtained from the surfacing section shown in a

Таблица 2. Результаты микрорентгеноспектрального анализа элементного состава участка наплавленного слоя, электронно-микроскопическое изображение которого представлено на рис. 1, а

Table 2. Results of micro-X-ray spectral analysis of elemental composition of a section of the deposited layer, electron microscopic image of which is presented in Fig. 1, a

Элемент	Относительное содержание	
	мас. %	ат. %
C (K)	7,09	26,44
Al (K)	1,28	2,13
Si (K)	0,19	0,30
Cr (K)	3,26	2,81
Mn (K)	0,51	0,41
Fe (K)	79,46	63,75
Co (K)	1,09	0,83
Mo (L)	7,12	3,32

Выполненные методами картирования исследования однородности распределения химических элементов, формирующих поверхностный слой наплавленного материала, свидетельствуют о локализации ряда химических элементов, а именно, молибдена, хрома и алюминия.

Методами рентгенофазового анализа установлено, что основными фазами материала наплавленного слоя являются твердый раствор на основе α -железа (88 мас. %) и твердый раствор на основе γ -железа (12 мас. %). Предположение о формировании твердых растворов на основе α - и γ -железа подтверждается существенным отличием параметров решетки α -железа (0,28803 нм) и γ -железа (0,36050 нм) от табличных значений параметров кристаллической решетки данных фаз [37]. Анализ рентгенограмм выявил присутствие дифракционных пиков сравнительно низкой интенсивности, которые соответствуют дифракционным максимумам карбидных фаз, присутствующих в наплавленном слое.

Конфигурационная энтропия, рассчитанная для данной быстрорежущей высокоэнтропийной стали по методике работы [38], составила 1,93R.

Таким образом, вышеприведенный анализ последних работ о состоянии вопросов получения и изучения средне- и высокоэнтропийных быстрорежущих сталей и данные авторов о структурно-фазовых состояниях электродуговой наплавки в среде азота высокоэнтропийной молибденовой стали неэквивалентного состава свидетельствуют об актуальности проблемы, ее практической и научной значимости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен литературный обзор последних публикаций отечественных и зарубежных исследователей по

средне- и высокоэнтропийным быстрорежущим сталям. Отмечена их более высокая твердость после закалки и отпуска по сравнению с традиционной быстрорежущей сталью Р6М5. Проанализированы механизмы упрочнения. Прослежена связь энтропии быстрорежущих сталей с их трибологическими характеристиками в условиях сухого трения. Приведены результаты экспериментального исследования структуры, элементного и фазового составов наплавки высокоэнтропийной быстрорежущей молибденовой стали на среднеуглеродистую сталь. Сделано заключение о перспективном направлении создания высокоэнтропийных быстрорежущих сталей нового поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Yeh J.-W., Chen Y.-L., Lin S.-J., Chen S.-K. High-entropy alloys – A new era of exploration. *Materials Science Forum*. 2007;560:1–9. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.560.1>
2. Чапайкин А.С., Громов В.Е., Чжан П., Иванов Ю.Ф., Крюков Р.Е., Шляров В.В., Семин А.П. Структурно-фазовые состояния и свойства плазменной наплавки быстрорежущей стали в среде азота. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;(1(47)):35–46. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-35-47](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-35-47)
3. Почетуха В.В., Башенко Л.П., Гостевская А.Н., Будовских Е.А., Громов В.Е., Чапайкин А.С. Структура и свойства плазменных покрытий из быстрорежущей стали после высокотемпературного отпуска. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;(3(45)):30–38. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-30-38](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-30-38)
4. Pochetukha V.V., Bashchenko L.P., Gostevskaya A.N., Budovskikh E.A., Gromov V.E., Chapaikin A.S. Structure and properties of plasma coatings from high-speed steel after high-temperature tempering. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;(3(45)):30–38. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3\(45\)-30-38](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-3(45)-30-38)
5. Liu H., Gu C., Zhai K., Wang C. Strengthening and toughening the FeNiCrMn medium entropy alloy by novel ultrafine precipitate networks. *Vacuum*. 2020;184:109995. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2020.109995>
6. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. 2017;122:448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
7. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*. 2018;61(1):2–22. <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
8. Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. Structure and Properties of High-Entropy Alloys. Springer, Advanced Structured Materials: 2021;107:110. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8>

8. Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A., Shlyarova Yu.A., Panchenko I.A. High Entropy Alloys: Structure and Properties. Moscow: Ru Science; 2022:204.
9. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высоко-энтропийных сплавов. *Физика металлов и металловедение*. 2020;121(8):807–841.
<https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>
Rogachev A.S. Structure, stability, and properties of high-entropy alloys. *Physics of Metals and Metallography*. 2020;121: 733–864. <https://doi.org/10.1134/S0031918X20080098>
10. Murty B.S., Yeh J.-W., Ranganathan S., Bhattacharjee P.P. High-Entropy Alloys. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier; 2019:374.
11. Zhang Y. High-Entropy Materials: A Brief Introduction. Singapore: Springer Nature; 2019:159.
<https://doi.org/10.1007/978-981-13-8526-1>
12. Ryzhkin A.A., Fominoff E.V., Shuchev C.G. Study on tribological characteristics of high entropy high-speed steels in conditions of dry friction on structural steel. In: *Proceedings of the 4th Int. Conf. on Industrial Engineering*. 2018:1819–1827.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_195
13. Fominov E., Shuchev C., Cherednichenko O., Metelkova N., Filonenko L. Tribological properties of high-entropy high-speed steels under conditions of friction on stainless steel 12H18N9T. In: *XI Int. Sci. and Pract. Conf. Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITSE-2023)*. 2023;431:06013.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343106013>
14. He J.Y., Wang H., Huang H.L., Xu X.D., Chen M.W., Wu Y., Liu X.J., Nieh T.G., An K., Lu Z.P. A precipitation-hardened high-entropy alloy with outstanding tensile properties. *Acta Materialia*. 2016;102:187–196.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.08.076>
15. Yang T., Zhao Y.L., Tong Y., Jiao Z.B., Wei J., Cai J.X., Han X.D., Chen D., Hu A., Kai J.J., Lu K., Liu Y., Liu C.T. Multi-component intermetallic nanoparticles and superb mechanical behaviors of complex alloys. *Science*. 2018;362(6427): 933–937. <https://doi.org/10.1126/science.aas8815>
16. Dou B., Zhang H., Tao Y., Ma Q., Guo S. Effect of Fe on type and distribution of carbides in medium-entropy high-speed steels. *Tungsten*. 2023;5(1):189–197.
<https://doi.org/10.1007/s42864-022-00138-5>
17. Gludovatz B., Hohenwarter A., Thurston K.V.S., Bei H., Wu Z., George E.P., Ritchie R.O. Exceptional damage-tolerance of a medium-entropy alloy CrCoNi at cryogenic temperatures. *Nature Communications*. 2016;7:10602.
<https://doi.org/10.1038/ncomms10602>
18. Huang H., Wang J., Yang H., Ji S., Liu Z. Strengthening CoCrNi medium-entropy alloy by tuning lattice defects. *Scripta Materialia*. 2020;188:216–221.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2020.07.027>
19. Zhang H., Pan Y., He Y.Z., Jiao H.S. Microstructure and properties of 6FeNiCoSiCrAlTi high-entropy alloy coating prepared by laser cladding. *Applied Surface Science*. 2011;257(6):2259–2263.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.09.084>
20. Yao M.J., Pradeep K.G., Tasan C.C., Raabe D. A novel, single phase, non-equiatomic FeMnNiCoCr high-entropy alloy with exceptional phase stability and tensile ductility. *Scripta Materialia*. 2014;72-73:5–8.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2013.09.030>
21. Zhuang Y.X., Liu W.J., Chen Z.Y., Xue H.D., He J.C. Effect of elemental interaction on microstructure and mechanical properties of FeCoNiCuAl alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2012;556:395–399.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.07.003>
22. Aguilar-Hurtado J.Y., Vargas-Uscategui A., Zambrano-Mera D., Palma-Hillerns R. The effect of boron content on the microstructure and mechanical properties of Fe_{50-x}Mn₃₀Co₁₀Cr₁₀B_x (X = 0, 0.3, 0.6 and 17 wt.%) multi-component alloys prepared by arc-melting. *Material Science and Engineering: A*. 2019;748:244–252.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.01.088>
23. Choi M., Ondicho I., Park N., Tsuji N. Strength–ductility balance in an ultrafine-grained non-equiatomic Fe₅₀(CoCrMnNi)₅₀ medium-entropy alloy with a fully recrystallized microstructure. *Journal of Alloys Compounds*. 2019;780:959–966.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.265>
24. Li R., Wang Z., Guo Z., Liaw P., Tao Z., Li L., Zhang Y. Graded microstructures of Al-Li-Mg-Zn-Cu entropic alloys under supergravity. *Science China Materials*. 2019;62(5): 736–744. <https://doi.org/10.1007/s40843-018-9365-8>
25. Zhang H., Dou B., Tang H., He Y., Guo S. Secondary hardening in laser rapidly solidified Fe₆₈(MoWCrVCoNiAlCu)₃₂ medium-entropy high-speed steel coatings. *Materials and Design*. 2018;159:224–231.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.08.050>
26. Ma S., Pan W., Xing J., Guo S., Fu H., Lyu P. Microstructure and hardening behavior of Al-modified Fe–1.5 wt%B–0.4 wt%C highspeed steel during heat treatment. *Materials Characterization*. 2017;132:1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.08.001>
27. Moon H.K., Lee K.B., Kwon H. Influences of Co addition and austenitizing temperature on secondary hardening and impact fracture behavior in P/M high speed steels of W–Mo–Cr–V(–Co) system. *Material Science and Engineering: A*. 2008;474(1-2):328–334.
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.04.014>
28. Long B.Z., Zhang Y., Guo C.H., Cui Y., Sun L.X., Chen D., Jiang F.C., Zhao T., Zhao G., Zhang Z.W. Enhanced dynamic mechanical properties and resistance to the formation of adiabatic shear band by Cu-rich nano-precipitates in high-strength steels. *International Journal of Plasticity*. 2020;138:102924.
<https://doi.org/10.1016/j.iplas.2020.102924>
29. Do H.-S., Choi W.-M., Lee B.-J. A thermodynamic description for the Co-Cr-Fe-Mn-Ni system. *Journal of Materials Science*. 2022;57:1373–1389.
<https://doi.org/10.1007/s10853-021-06604-8>
30. Otto F., Dlouhý A., Pradeep K.G., Kuběňová M., Raabe D., Eggeler G., George E.P. Decomposition of the single-phase high-entropy alloy CrMnFeCoNi after prolonged anneals at intermediate temperatures. *Acta Materialia*. 2016;112:40–52.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.04.005>
31. Stepanov N.D., Shaysultanov D.G., Ozerov M.S., Zhreb-tsov S.V., Salishchev G.A. Second phase formation in the CoCrFeNiMn high entropy alloy after recrystallization annealing. *Materials Letters*. 2016;185:1–4.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.08.088>
32. Shafiei A. Design of eutectic high entropy alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2022;53:4329–4361.
<https://doi.org/10.1007/s11661-022-06831-x>
33. Beskopylny A.N., Fominov E.V., Shuchev C.G., Egorov M.S. The influence of thermodynamical characteristics of high

speed steels on temperature and forces values when turning construction steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;996:012003.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/996/1/012003>

34. Mauzoor A., Pandey S., Chokraborty D., Phillpot S.R., Aidhy D.S. Entropy contributions to phase stability in binary random solid solutions. *Computational Materials*. 2018;4(1):47.

<https://doi.org/10.1038/s41524-018-0102-y>

35. Громов В.Е., Чапайкин А.С., Невский С.А. Структура, свойства и модели быстрорежущей стали после отпуска и электронно-пучковой обработки. Новокузнецк: Полиграфист; 2024:171.

36. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Potekaev A.I., Guseva T.P., Chapaikin A.S., Vashchuk E.S., Romanov D.A. Structure and properties of R18U surfacing of high-speed steel after

its high tempering. *Russian Physics Journal*. 2023;66(7): 731–739. <https://doi.org/10.1007/s11182-023-02999-w>

37. Курдюмов В.Г., Утевский Л.М., Энтин Р.И. Превращения в железе и стали. Москва: Наука; 1977:238.

38. Осинцев К.А., Панченко И.А., Коновалов С.В. Прогнозирование фазового состава высокоэнтропийного сплава CoCr-Zr-Mn-Ni с помощью расчета феноменологических критериев. *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2021;18(4):441–449.

<https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2021.04.006>

Osintsev K.A., Panchenko I.A., Kononov S.V. Prediction of the phase composition of Co-Cr-Zr-Mn-Ni high-entropy alloy by calculating phenomenological criteria. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2021;18(4):441–449. (In Russ.).

<https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2021.04.006>

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

Сергей Сергеевич Миненко, соискатель степени к.т.н. кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0009-0003-6592-2276

E-mail: mss121278@mail.ru

Александр Сергеевич Чапайкин, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: thapajkin.as@yandex.ru

Александр Петрович Семин, к.т.н., старший научный сотрудник управления научных исследований, доцент кафедры инженерных конструкций, строительных технологий и материалов, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-3989-7420

E-mail: syomin53@gmail.com

Юлия Андреевна Шлярова, научный сотрудник управления научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0001-5677-1427

E-mail: rubannikova96@mail.ru

Viktor E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Sergei S. Minenko, Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

ORCID: 0009-0003-6592-2276

E-mail: mss121278@mail.ru

Aleksandr S. Chapaikin, Postgraduate of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

E-mail: thapajkin.as@yandex.ru

Aleksandr P. Semin, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Department of Scientific Research, Assist. Prof. of the Chair of Engineering Structures, Building Technologies and Materials, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-3989-7420

E-mail: syomin53@gmail.com

Yuliya A. Shlyarova, Research Associate of Department of Scientific Researches, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0001-5677-1427

E-mail: rubannikova96@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

В. Е. Громов – концепция работы, научное руководство, написание текста.

С. С. Миненко – обзор литературы, подготовка образцов для СЭМ.

А. С. Чапайкин – проведение исследований методами сканирующей электронной микроскопии, интерпретация результатов.

А. П. Семин – анализ результатов электронно-микроскопических исследований.

Ю. А. Шлярова – обсуждение результатов, редактирование текста.

V. E. Gromov – conceptualization, scientific guidance, writing the text.

S. S. Minenko – literature review, preparation of the samples for SEM.

A. S. Chapaikin – conducting research using scanning electron microscopy methods, interpreting the results.

A. P. Semin – analyzing the results of electron microscopic studies.

Yu. A. Shlyarova – discussing the results, editing the text.

Поступила в редакцию 03.06.2024

После доработки 10.10.2024

Принята к публикации 12.12.2024

Received 03.06.2024

Revised 10.10.2024

Accepted 12.12.2024



УДК 669.018.25+621.373.8:621.78

DOI 10.17073/0368-0797-2025-4-357-365



Оригинальная статья

Original article

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ ВОЛЬФРАМОКОБАЛЬТОВЫХ ТВЕРДЫХ СПЛАВОВ

С. И. Яреско¹, С. Н. Балакиров¹, Т. Н. Осолкова²¹ Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (Россия, 443011, Самара, ул. Ново-Садовая, 221)² Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

✉ serg19541959@mail.ru

Аннотация. Рассматриваемый аналитический метод определения оптимального режима упрочняющей импульсной лазерной обработки (ЛЮ) вольфрамокобальтовых твердых сплавов основан на исследовании закономерностей формирования температурного поля при упрочнении твердых сплавов, определении термических напряжений, возникающих в зоне лазерного воздействия (ЗЛВ) при лазерной импульсной обработке, и сравнении их с напряжениями разрушения отдельных структурных элементов сплава. Оптимальными режимами упрочняющей ЛЮ сплавов группы ВК считаются режимы, удовлетворяющие двум критериям. Во-первых, температура на поверхности ЗЛВ должна находиться в интервале $1290\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, когда в ЗЛВ не присутствуют разупрочняющие сплав фазы типов $\eta\text{-Co}_3\text{W}_3\text{C}$, $\theta\text{-Co}_3\text{W}_2\text{C}$, $\chi\text{-Co}_3\text{W}_9\text{C}_4$, а укрупнение зерен карбидной фазы незначительно. Во-вторых, в ЗЛВ недопустимо появление трещин произвольного масштаба, то есть термические напряжения, возникающие в результате ЛЮ, не должны превышать напряжений разрушения структурных элементов сплава. Расчет термических напряжений, возникающих в твердом сплаве при лазерной обработке в пределах одного карбидного зерна, выполняется в соответствии с законом Гука. Расчеты, выполненные как для однократной, так и для многократной обработки, позволяют установить, что для всех исследованных режимов при вариации плотности энергии лазерного излучения от 0,9 до 1,8 Дж/мм² и кратности обработки от 1 до 10, когда температура на поверхности находится в диапазоне 1290 – 1400 °С, термические напряжения в карбидной фазе меньше минимальных напряжений разрушения и не превосходят 80 МПа. Предложенный аналитический метод определения предельных энергетических характеристик позволяет установить режимы импульсной ЛЮ, которые обеспечивают дисперсионное упрочнение твердых сплавов вольфрамокобальтовой группы при отсутствии деструктивных изменений в ЗЛВ. Полученные данные о режимах бездефектной лазерной обработки хорошо согласуются с более ранними результатами измерений сигнала акустической эмиссии при обработке твердых сплавов (сплава ВК8).

Ключевые слова: лазерная импульсная обработка, вольфрамокобальтовый твердый сплав, трещиностойкость, температурное поле, термические напряжения, градиент температуры, карбидная фаза

Для цитирования: Яреско С.И., Балакиров С.Н., Осолкова Т.Н. Предельные энергетические характеристики при лазерной импульсной обработке вольфрамокобальтовых твердых сплавов. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(4):357–365.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-357-365>

LIMITING ENERGY CHARACTERISTICS DURING LASER PULSE TREATMENT OF TUNGSTEN-COBALT HARD ALLOYS

S. I. Yaresko¹, S. N. Balakirov¹, T. N. Oskolkova²¹ Samara Branch of the Lebedev Institute of Physics, Russian Academy of Sciences (221 Novo-Sadovaya Str., Samara 443011, Russian Federation)² Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

✉ serg19541959@mail.ru

Abstract. The considered analytical method for determining the optimal mode of hardening pulsed laser treatment (LT) of tungsten-cobalt hard alloys is based on the study of the patterns of temperature field formation during hardening of hard alloys, determination of thermal stresses occurring in the laser exposure zone (LEZ) during laser pulse treatment, and their comparison with the stresses of fracture of the alloy individual structural

elements. The optimal modes of hardening LT of the alloys of WC group are considered to be modes that meet two criteria. First, the temperature on the LEZ surface should be in the range of $1290^{\circ}\text{C} < T < 1400^{\circ}\text{C}$, when the alloy does not contain weakening it phases of the $\eta\text{-Co}_3\text{W}_2\text{C}$, $\theta\text{-Co}_3\text{W}_2\text{C}$, or $\chi\text{-Co}_3\text{W}_9\text{C}_4$ types, and increase in grain size of the carbide phase is insignificant. Secondly, cracks of an arbitrary scale are unacceptable in the LEZ, that is, the thermal stresses resulting from the fracture should not exceed the stresses of fracture of the alloy structural elements. The calculation of thermal stresses occurring in a hard alloy during LT within a single carbide grain was carried out in accordance with the Hooke's law. Calculations performed for both single and multiple treatments allow us to establish that for all the studied modes, with variations in the laser energy density from 0.9 to 1.8 J/mm² and treatment multiplicity from 1 to 10, when the surface temperature is in the range of 1290 – 1400 °C, the thermal stresses in the carbide phase are lower than minimum fracture stresses and do not exceed 80 MPa. The proposed analytical method for determining the limiting energy characteristics makes it possible to establish pulsed LT modes that provide dispersion hardening of hard alloys of the WC group in the absence of destructive changes in the material. The data obtained on defect-free LT modes are in good agreement with the earlier results of measurements of acoustic emission signals during treatment of hard alloys (VK8 alloy).

Keywords: laser pulse treatment, tungsten-cobalt hard alloy, crack resistance, temperature field, thermal stresses, temperature gradient, carbide phase

For citation: Yaresko S.I., Balakirov S.N., Oskolkova T.N. Limiting energy characteristics during laser pulse treatment of tungsten-cobalt hard alloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(4):357–365. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-357-365>

ВВЕДЕНИЕ

В машиностроительном производстве основными инструментальными материалами являются твердые сплавы (сплавы системы WC–Co с содержанием кобальта 6 – 8 %). Современные условия развития промышленности требуют от твердосплавного режущего инструмента (РИ) повышенной стойкости. В первую очередь это обусловлено расширением номенклатуры обрабатываемых материалов: от жаростойких и жаропрочных сталей и сплавов до композиционных материалов. Для решения этой проблемы предлагаются разные подходы, направленные на изменение состава и структуры сплавов как во всем объеме, так и в поверхностном слое. Одним из таких методов является упрочняющая лазерная обработка (ЛО) передней поверхности режущего клина инструмента. Рассматриваемый метод позволяет повысить стойкость твердосплавного инструмента в несколько раз [1 – 3]. Тем не менее в условиях машиностроительного производства лазерное упрочнение твердосплавного РИ применяется значительно реже других методов, например, метода нанесения износостойких покрытий [4; 5]. Износостойкие покрытия, как и структуры поверхностного слоя зоны лазерной обработки, являются эффективным барьером для диффузионного взаимодействия обрабатываемого и инструментального материалов при больших скоростях резания. После ЛО рост сопротивления разрушению связующей Co-фазы, проявляющийся в снижении охрупчивания поверхностных слоев сплава в процессе эксплуатации инструмента, обусловлен наличием избыточного вольфрама, растворенного в кобальте, что затрудняет диффузию железа в кобальт и образование железувольфрамовых карбидов в процессе резания [6].

При всех достоинствах лазерного упрочнения твердых сплавов одной из основных проблем его применения для повышения эксплуатационных характеристик РИ является определение оптимальных режимов ЛО. Это связано с формированием сложного напряженного состояния в зоне ЛО, вызванного отличающимися теплофизическими характеристиками составляющих сплав фаз и ограниченностью области нагрева. Опти-

мальный режим ЛО должен обеспечивать упрочнение сплава при сохранении сплошности поверхностного слоя материала. При выборе режимов упрочняющей ЛО твердых сплавов необходимо тщательно проработать вопрос создания оперативной, надежной и обоснованной методики.

Целью настоящей работы является разработка метода определения оптимального режима упрочняющей импульсной лазерной обработки вольфрамокобальтовых твердых сплавов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При импульсной ЛО твердых сплавов, когда в зоне лазерного воздействия (ЗЛВ) наблюдается образование износостойких структур, несомненным достоинством является возможность ее осуществления без нарушений сплошности поверхностного слоя материала. В этом случае не требуется дополнительного принудительного изменения геометрии режущих поверхностей инструмента, существенно расширяется область его применения, становится возможной обработка твердосплавных сменных многогранных пластин наряду с напайными пластинами.

Процесс лазерной термической обработки сплавов группы ВК является достаточно специфичным в силу неомогенности материала и особенностей его изготовления и часто приводит к деструктивным изменениям (росту карбидного зерна, пористости, трещинообразованию, образованию двойных карбидов) в ЗЛВ [2; 7 – 13].

Требования к параметрам лазерного излучения (ЛИ), обеспечивающим бездефектную обработку твердых сплавов, известны только для ряда частных случаев. В работе [2] упоминается об однократном облучении пятном с гауссовым распределением интенсивности, а с целью получения в поверхностном слое компактной переплавленной мелкозернистой структуры рекомендуется применение CO₂-лазера, работающего в частотном режиме [11]. Для наиболее эффективного способа ЛО, состоящего в многократном облучении сплава [2], вопрос о выборе режимов бездефектного лазерного воз-

действия, при котором наблюдается упрочнение сплава, остается открытым.

Сложность назначения режимов импульсной ЛО твердых сплавов заключается в том, что при недостаточной плотности энергии ЛП не происходит упрочнения сплава, а при слишком высокой плотности энергии наблюдается трещинообразование в зоне ЛО (рис. 1).

Наличие трещин, которые являются основным деструктивным элементом при ЛО сплавов, независимо от их природы, расположения и глубины, главным образом, определяет работоспособность твердых сплавов [7; 11 – 14]. Можно выделить несколько причин образования трещин в ЗЛВ. Неравномерность распределения энергии по сечению лазерного пучка приводит к возникновению трещин, охватывающих зону обработки. Эта причина устранима, например, при ЛО с использованием фокусирующего призмического раstra [2; 6; 15], который обеспечивает неравномерность распределения интенсивности в зоне ЛО не более 5 %. Ограниченность области нагрева по глубине приводит к появлению трещин, образующих на поверхности мелкочаистую сетку (рис. 1) и распространяющихся на глубину порядка толщины модифицированного слоя. Следующий тип трещин затрагивает элементы микроструктуры сплава. Эти трещины проходят через зерна исходного карбида α -WC или по границам WC–WC. Основной причиной их возникновения следует считать различие в термических коэффициентах линейного расширения WC и Co-фаз сплавов ($\alpha_{WC} = 4,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $\alpha_{Co} = 14,2 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [1]), наклеп и изменение фазового состава сплава при ЛО (появление по границам карбидных зерен более хрупких двойных карбидов, уменьшающих содержание кобальта в сплаве) [2; 6; 15].

Указанные причины появления трещин различного масштаба являются следствием перераспределения микро- и макронапряжений в ЗЛВ твердых сплавов. При высокоскоростном нагреве в процессе лазерной обработки возникающие в ЗЛВ при определенных дозах

облучения термические напряжения могут превышать величину разрушающих напряжений для отдельных структурных элементов сплава [1]. Это может быть положено в основу методики определения оптимальных режимов ЛО твердых сплавов группы ВК.

В связи с вышесказанным целесообразно предельные энергетические характеристики при импульсной ЛО вольфрамокобальтовых твердых сплавов определять по началу появления микротрещин на поверхности ЗЛВ. В качестве режимов ЛО, обеспечивающих упрочнение твердого сплава, необходимо выбирать такие плотность энергии и кратность ЛО, при которых достигаются максимальные температура нагрева и глубина зоны упрочнения, но при этом гарантированно не происходит образования микротрещин в ЗЛВ.

Определить режимы ЛО, при которых начинается трещинообразование, можно экспериментально при последовательном увеличении плотности энергии ЛП, контролируя в этом случае сплошность поверхности ЗЛВ или визуально (при увеличении 50 – 60 крат), или по сигналу акустической эмиссии (АЭ) [2]. Рассматриваемая методика является достаточно трудоемкой и может быть использована только в лабораторных условиях.

В связи с этим становится актуальной разработка способа, позволяющего оперативно определять предельные энергетические характеристики упрочнения твердых сплавов группы ВК, не вызывающие их трещинообразования. В настоящей работе для этого использован аналитический метод, основанный на исследовании закономерностей формирования температурного поля при упрочнении твердых сплавов, определении термических напряжений, возникающих в ЗЛВ при лазерной импульсной обработке, и сравнении их с напряжениями разрушения отдельных структурных элементов сплава.

МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

В качестве объекта исследования был выбран двухфазный твердый сплав ВК6 (WC – 6 % Co), основным назначением которого согласно ГОСТ 3882 – 74 является применение в качестве режущего и бурильного инструмента. Для рассматриваемого сплава была разработана и апробирована методика определения термических напряжений в ЗЛВ при импульсной ЛО, которая также может быть применена к другим сплавам этой группы.

Облучение сплавов осуществлялось на лазерной установке, собранной на основе импульсного твердотельного лазера на стекле с неодимом. Плотность энергии излучения ϵ варьировалась от 0,8 до 1,8 Дж/мм² при длительности импульса $\tau = (5 \div 11) \cdot 10^{-3}$ с, частота следования импульсов 1 Гц. Для создания в зоне ЛО на участке 4×4 мм равномерного распределения плотности энергии использовали фокусирующий призмический

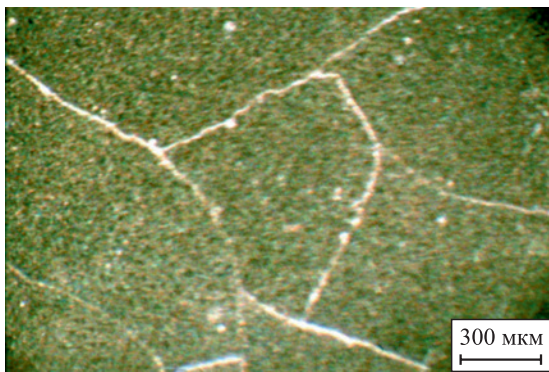


Рис. 1. Трещины на поверхности зоны лазерной обработки (сплав ВК8) при плотности энергии 2,0 Дж/мм², кратности обработки 10

Fig. 1. Cracks on the surface of laser treatment zone (VK8 alloy) at energy density 2.0 J/mm², treatment multiplicity 10

ный растр [2; 6; 15]. В настоящей работе рассматривали несколько схем и режимов ЛО как с использованием фокусирующего призматического растра, так и без его применения при различной кратности обработки (N).

Изучение структуры сплавов после ЛО проводили на поперечных шлифах с использованием оптического микроскопа Neophot-30 и сканирующего электронного микроскопа Jeol JSM 6390A.

При вычислении температурного поля в ЗЛВ и значений градиента температуры был использован программный продукт Mathcad.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

В соответствии со «скелетной» моделью структуры вольфрамокобальтовых твердых сплавов [1; 16] структурными элементами в спеченных твердых сплавах являются Co-связка, зерно WC, граница WC–WC, граница зерна WC–Co-связка (рис. 2). Сплавы группы ВК – это композиционные инструментальные материалы, прочность которых с точки зрения контактного взаимодействия при резании определяется прочностью каждого структурного элемента [17]. Разрушающие напряжения σ_p для структурных элементов твердого сплава ВК8 принимают следующие значения: для Co-связки толщиной 1,5 мкм $\sigma_p = 5000$ МПа, для карбидного зерна размером 2 мкм $\sigma_p = 180$ МПа, на границе WC–WC $\sigma_p = 80$ МПа, на границе WC–Co-связка $\sigma_p = 100$ МПа [18]. Видно, что разрушение твердого сплава происходит, в первую очередь, в месте контакта зерен WC, то есть наиболее слабым структурным элементом в твердом сплаве являются межзеренные границы, а наиболее прочным – связующая фаза.

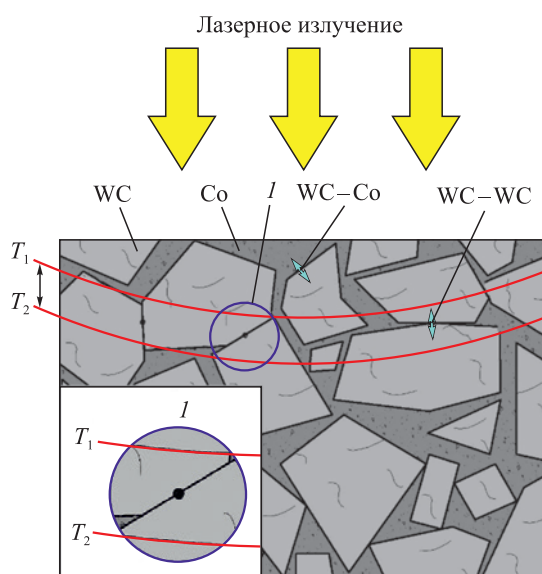


Рис. 2. Структурные элементы вольфрамокобальтового сплава и схема его лазерной обработки

Fig. 2. Structural elements of a tungsten-cobalt alloy and the scheme of its laser treatment

При анализе результатов конечно-элементного моделирования напряженного состояния сплава ВК8 констатируется [19], что места срастания зерен WC являются концентраторами напряжений (под воздействием термических напряжений и нагрузки), интенсивность которых в несколько раз превышает интенсивность прикладываемого напряжения. Эти данные подтверждены в работе [20], согласно которым микротрещины зарождаются преимущественно на контактных карбидных WC/WC и межфазных WC/Co поверхностях, а последовательность слабых звеньев при прохождении магистральной трещины имеет вид WC/WC, WC, WC/Co, Co.

Для моделирования и расчета термических напряжений в процессе лазерной обработки рассмотрим схему, содержащую все структурные элементы сплава (рис. 2). Выделим в этой системе отдельное зерно карбида вольфрама, взаимодействующее с соседними зернами и Co-прослойкой. При этом предполагается, что зерно карбида вольфрама WC пластически не деформируется, хотя возможно скольжение по базисным плоскостям при внешнем нагружении [21]. Термические напряжения, возникающие в твердом сплаве в пределах одного зерна, в соответствии с законом Гука можно определить следующим образом:

$$\sigma = \Delta T \alpha E, \quad (1)$$

где ΔT – разница температур при ЛО в пределах размера одного зерна в направлении в глубину материала; $\alpha = 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ – коэффициент линейного температурного расширения [2]; $E = 628$ ГПа – модуль упругости Юнга [2].

Размер зерен карбидной фазы в твердых сплавах меняется от 0,5 до 6,0 мкм [18]. Для отработки методики далее в расчетах принято среднее значение размера зерна карбидной фазы 4 мкм, что соответствует среднему размеру зерна WC крупнозернистых твердых сплавов ВК6-В, ВК8-В [2; 22].

Температурное поле при ЛО, с одной стороны, определяет протекание структурно-фазовых превращений в ЗЛВ [2; 6; 15], способствующих повышению межфазной прочности сплава, а, с другой стороны, распределение температуры оказывает решающее влияние на величину и распределение остаточных напряжений в ЗЛВ и трещиностойкость сплава при обработке. Выбор предельных энергетических характеристик импульсной ЛО твердых сплавов группы ВК должен обеспечивать дисперсионное упрочнение сплава при отсутствии нарушения сплошности поверхности ЗЛВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Распределение температуры в ЗЛВ при импульсной ЛО было получено в приближении одномерной линейной модели нагрева полубесконечного однородного

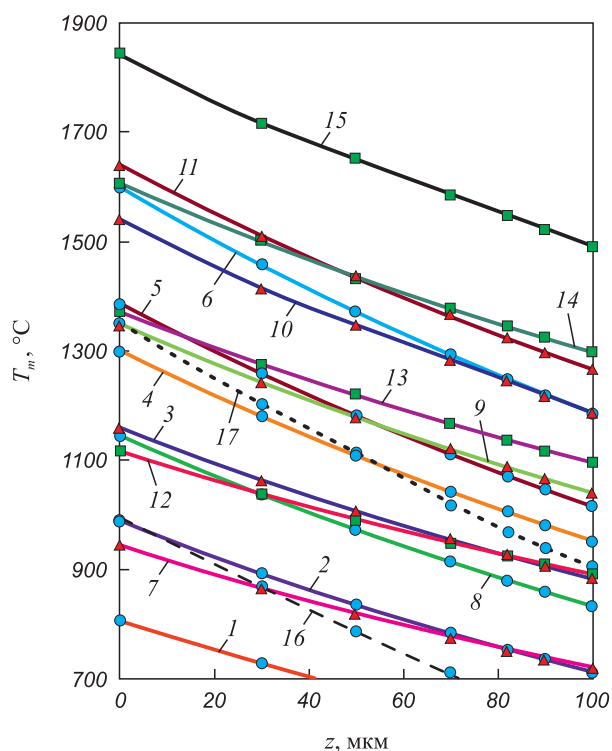


Рис. 3. Температура карбидной фазы сплава ВК6 в зависимости от глубины ЗЛВ при различных условиях облучения с использованием раstra:

● — $N = 1$; ▲ — $N = 5$; ■ — $N = 10$;
 1, 7, 12 — $\epsilon = 0,8$ Дж/мм²; 2, 3, 13 — $\epsilon = 1,0$ Дж/мм²;
 8, 9, 14 — $\epsilon = 1,2$ Дж/мм²; 4, 10, 15 — $\epsilon = 1,4$ Дж/мм²;
 5, 11 — $\epsilon = 1,5$ Дж/мм²; 6 — $\epsilon = 1,8$ Дж/мм²;
 16, 17 — без применения раstra при $N = 1$ и $\epsilon 0,8$ и $1,2$ Дж/мм²

Fig. 3. Temperature of VK6 alloy carbide phase as a function of LEZ depth under various irradiation conditions using a raster:

● — $N = 1$; ▲ — $N = 5$; ■ — $N = 10$;
 1, 7, 12 — $\epsilon = 0.8$ J/mm²; 2, 3, 13 — $\epsilon = 1.0$ J/mm²;
 8, 9, 14 — $\epsilon = 1.2$ J/mm²; 4, 10, 15 — $\epsilon = 1.4$ J/mm²;
 5, 11 — $\epsilon = 1.5$ J/mm²; 6 — $\epsilon = 1.8$ J/mm²;
 16, 17 — without raster at $N = 1$ and $\epsilon 0.8$ and 1.2 J/mm²

тела плоским однородным поверхностным источником [2]. На рис. 3 показаны зависимости температуры T_m карбидной фазы (WC) при различных значениях ϵ и N от глубины z .

Таблица 1. Расчетные значения температуры на поверхности ЗЛВ ($z = 0$) при различных режимах ЛО

Table 1. Calculated values of LEZ surface temperature ($z = 0$) under various heating conditions of LT

Показатель	Значение показателя									
ϵ , Дж/мм ²	0,8			1,0			1,1	1,2		
N	1	5	10	1	5	10	10	1	5	10
T , °C	806 (1)	945 (5)	1117 (12)	987 (2)	1159 (3)	1371 (10)	1486 (10)	1145 (8)	1349 (9)	1606 (14)
ϵ , Дж/мм ²	1,4			1,5		1,8	0,8		1,2	
N	1	5	10	1	5	1	без раstra $N = 1$			
T , °C	1300 (4)	1542 (10)	1844 (15)	1385 (5)	1641 (11)	1600 (6)	990 (16)		1350 (17)	
Пр и м е ч а н и е. В скобках указан номер кривой (режим) на рис. 3.										

Примечание. В скобках указан номер кривой (режим) на рис. 3.

В табл. 1 приведены расчетные значения температуры на поверхности ЗЛВ, по которой можно оценить термические напряжения, возникающие в наиболее склонных к разрушению структурных элементах сплава.

Исследование структуры и состава ЗЛВ свидетельствует о том, что наиболее целесообразна ЛО твердых WC-Co сплавов, когда температура в зоне облучения достигает температуры плавления эвтектики 1298–1357 °C или незначительно отличается от нее (находится в пределах 1290–1400 °C), а длительность воздействия наибольшая [2]. При этом укрупнение зерен карбидной фазы незначительно, а степень растворимости карбида вольфрама в кобальте существенно увеличивается по сравнению с растворимостью в твердом состоянии.

Согласно полученным расчетным данным указанным значениям температурного интервала соответствуют режимы 4 ($\epsilon = 1,4$ Дж/мм², $N = 1$), 5 ($\epsilon = 1,5$ Дж/мм², $N = 1$), 9 ($\epsilon = 1,2$ Дж/мм², $N = 5$), 13 ($\epsilon = 1,0$ Дж/мм², $N = 10$) (табл. 1), что достаточно хорошо совпадает с данными стойкостных испытаний облученных твердосплавных резцов [2; 6; 15]. При этих режимах ЛО укрупнение зерен карбидной фазы незначительно, а образования способствующих разупрочнению обработанной зоны сложных карбидов типов η -Co₃W₃C, θ -Co₃W₂C, χ -Co₃W₉C₄ не наблюдается. Эти фазы уменьшают содержание металлического кобальта в прослойке, связывая его и ослабляя закрепление карбидного скелета в связке, что в итоге приводит к разрушению сплава.

Динамика нарастания температуры на поверхности ЗЛВ при многократной ЛО при $\epsilon = 0,9$ Дж/мм² представлена рис. 4 (штриховой линией обозначен диапазон температур 1290–1400 °C как наиболее благоприятный для ЛО). Только к 12-ому импульсу температура на поверхности ЗЛВ превышает 1290 °C. Последующее увеличение кратности обработки приводит к деструктивным изменениям в ЗЛВ.

Режимы упрочняющей ЛО и соответствующие им диапазоны температур на поверхности ЗЛВ приведены на рис. 5. При плотности энергии больше 0,9 Дж/мм²

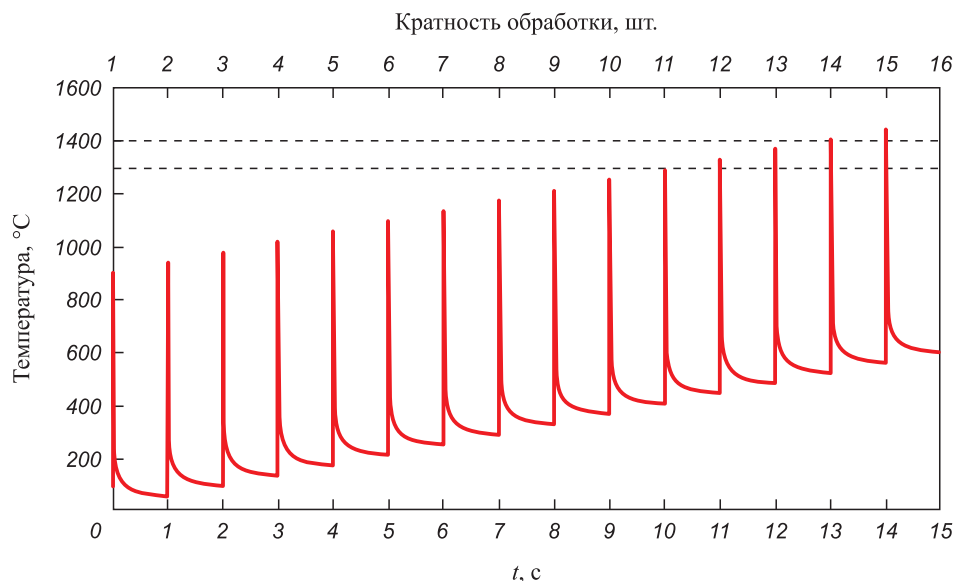


Рис. 4. Изменение температуры на поверхности сплава ВК6 при многократном облучении ($\epsilon = 0,9$ Дж/мм²)

Fig. 4. Change in temperature of VK6 alloy surface under repeated irradiation ($\epsilon = 0.9$ J/mm²)

заданный температурный интервал достигается раньше, например, для $\epsilon = 1,1$ Дж/мм² при N , равном 7 и 8, а для плотности энергии $\epsilon = 1,4$ Дж/мм² при N , равном 1 и 2.

Распределение температуры в ЗЛВ определяет не только протекание структурно-фазовых превращений при ЛО, но и формирует поле термических напряжений, тем самым оказывая влияние на прочность материала.

В предположении, что градиент температуры максимален в момент времени $t = 0,5\tau_n$, для расчета величины ΔT из выражения (1), необходимой для определения термических напряжений, использовали аналитическое

выражение для температуры $T(z, t)$ из работы [2]. Термические напряжения в карбидной фазе (как в одном из наиболее склонных к разрушению при нагружении структурных элементов), в зависимости от режимов ЛО получаются простым дифференцированием температуры $T(z, t)$ и последующим пересчетом полученного значения на размер WC зерна.

Оптимальными следует считать режимы упрочняющей ЛО сплавов группы ВК, которые удовлетворяют двум критериям. Во-первых, температура на поверхности ЗЛВ находится в пределах $1290^\circ\text{C} < T < 1400^\circ\text{C}$, когда в ЗЛВ не присутствуют разупрочняющие сплав фазы, а укрупнение зерен карбидной фазы незначительно. Во-вторых, в ЗЛВ недопустимо появление трещин произвольного масштаба, то есть термические напряжения, возникающие в результате ЛО, не должны превышать напряжения разрушения структурных элементов сплава. Установлено, что для всех исследованных режимов, когда температура на поверхности находится в диапазоне $1290 - 1400^\circ\text{C}$ (рис. 5), термические напряжения в карбидной фазе меньше напряжений разрушения. Для таких режимов рассчитанные по формуле (1) напряжения приведены в табл. 2.

Выход за верхнюю границу указанного температурного интервала не приводит к разрушению карбидного зерна, но, как правило, увеличивает количество крупных зерен и приводит к появлению по границам зерен сложных карбидов, что ведет к нарушению работоспособности сплава как инструментального материала.

Полученные данные хорошо согласуются с результатами измерений сигнала АЭ при обработке сплава ВК8 (рис. 6) [2]. С увеличением общего количества зарегистрированных импульсов АЭ трещиностойкость падает. Согласно экспериментальным данным

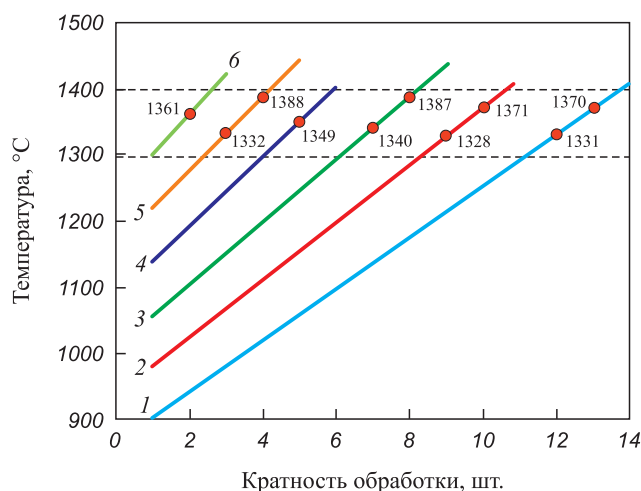


Рис. 5. Диапазон температур упрочнения сплава ВК6 при многократном облучении, Дж/мм²:

1 – 0,9; 2 – 1,0; 3 – 1,1; 4 – 1,2; 5 – 1,3; 6 – 1,4

Fig. 5. Temperature range of hardening of VK6 alloy under repeated irradiation at J/mm²:

1 – 0.9; 2 – 1.0; 3 – 1.1; 4 – 1.2; 5 – 1.3; 6 – 1.4

Таблица 2. Напряжения в карбидной фазе сплава ВК6 при различных режимах ЛО

Table 2. Stresses in VK6 alloy carbide phase under various heating conditions of LT

ε , Дж/мм ²	N	Максимальная температура, °С	σ , МПа
0,9	12	1331	58,2
1,0	10	1371	62,6
1,1	8	1387	66,7
1,2	5	1349	70,6
1,3	4	1388	74,2
1,4	2	1361	78,4

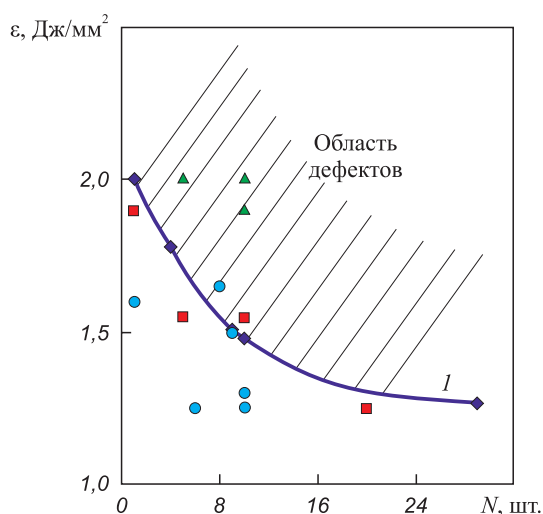


Рис. 6. Предельные значения ε , соответствующие появлению поверхностных визуально фиксируемых трещин, в зависимости от кратности облучения при обработке сплава ВК6 с растром (кривая 1), и данные, полученные методом АЭ:
 ● – $N_{\Sigma} = 0$; ■ – $N_{\Sigma} \leq 4 \div 6$; ▲ – $N_{\Sigma} > 4 \div 6$

Fig. 6. Limiting values of ε corresponding to appearance of surface visually fixed cracks depending on the number of laser pulses during VK6 alloy treatment with a raster (curve 1), and data obtained by the acoustic emission method:
 ● – $N_{\Sigma} = 0$; ■ – $N_{\Sigma} \leq 4 \div 6$; ▲ – $N_{\Sigma} > 4 \div 6$

ниже кривой (рис. 6) находится бездефектная область обработки ($N_{\Sigma} = 0$): $N = 10$, $\varepsilon = 1,25$ и $1,30$ Дж/мм²; $N = 9$, $\varepsilon = 1,5$ Дж/мм²; $N = 6$, $\varepsilon = 1,25$ Дж/мм²; $N = 1$, $\varepsilon = 1,6$ Дж/мм². Полагая [23], что сплавы ВК6 и ВК8 близки по своим теплофизическим характеристикам, можно сопоставить данные, приведенные на рис. 6, и расчетные режимы ЛО (табл. 2). Все приведенные в табл. 2 режимы ЛО попадают в область бездефектной обработки, когда напряжения в карбидной фазе меньше напряжений разрушения.

Предложенный аналитический метод определения предельных энергетических характеристик позволяет установить режимы импульсной ЛО, которые обеспе-

чивают дисперсионное упрочнение твердого сплава при отсутствии деструктивных изменений в ЗЛВ.

Выводы

Разработана и апробирована методика определения предельных энергетических характеристик лазерной импульсной упрочняющей обработки твердых сплавов вольфрамокобальтовой группы. Показано, что оптимальные режимы лазерной обработки должны удовлетворять двум критериям. Во-первых, температура на поверхности ЗЛВ должна находиться в интервале от 1290 до 1400 °С, когда в ЗЛВ не присутствуют разупрочняющие сплав фазы, а укрупнение зерен карбидной фазы незначительно. Во-вторых, термические напряжения, возникающие в результате ЛО, не должны превышать напряжений разрушения структурных элементов сплава.

Установлено, что для всех исследованных режимов, когда температура на поверхности находится в диапазоне 1290 – 1400 °С, термические напряжения в карбидной фазе меньше напряжений разрушения.

Полученные данные о режимах бездефектной лазерной обработки хорошо согласуются с результатами измерений сигнала АЭ при обработке твердого сплава ВК8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Лошак М.Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. Киев: Наукова думка; 1984:328.
2. Яреско С.И., Осколкова Т.Н., Балакиров С.Н. Модификация структуры и свойств вольфрамокобальтовых твердых сплавов. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия; 2023:400.
3. Zimmermann M., Kirsch B., Kang Y., Herrmann T., Aurich J.C. Influence of the laser parameters on the cutting edge preparation and the performance of cemented carbide indexable inserts. *Journal of Manufacturing Processes*. 2000;58:845–856. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.003>
4. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. Москва: Машиностроение; 2008:311.
5. Григорьев С.Н., Волосова М.А. Нанесение покрытий на инструмент. Москва: ИТО; 2007:64.
6. Яреско С.И. Влияние состава кобальтовой фазы твердых сплавов на изнашивание инструмента после лазерного упрочнения. *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2009;(2):54–61.
7. Yares'ko S.I. The effect of cobalt phase composition in hard alloys on tool wear after laser hardening. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2009;(2):54–61. (In Russ.).
8. Karatas C., Yilbas B.S., Aleem A., Ahsan M. Laser treatment of cemented carbide cutting tool. *Journal of Materials Processing Technology*. 2007;183(2-3):234–240. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.10.012>

8. Осолкова Т.Н., Глезер А.М. Современное состояние научной проблемы поверхностного упрочнения карбидо-вольфрамовых твердых сплавов (обзор). *Известия вузов. Черная металлургия*. 2017;60(12):980–991.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-12-980-991>
Oskolkova T.N., Glezer A.M. Current state of the scientific problem of WC–Co hard alloys surface hardening (Review). *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017; 60(12):980–991. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-12-980-991>
9. Li T., Lou Q., Dong J., Wei Y., Liu J. Phase transformation during surface ablation of cobalt-cemented tungsten carbide with pulsed UV laser. *Applied Physics A*. 2001;73(3):391–397.
<https://doi.org/10.1007/s003390100745>
10. Kolodziejczak P., Wilkowski J., Barlak M. Modification of the surfaces of wood cutting tools using CO₂ laser – SEM analysis. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Forestry and Wood Technology*. 2017;98:48–52.
11. Yilbas B.S., Shuja S.Z., Khan S.M.A. Laser repetitive pulse heating of tool surface. *Optics & Laser Technology*. 2011;43(4):754–761.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2010.12.013>
12. Hazzan K.E., Pacella M., See T.L. Understanding the surface integrity of laser surface engineered tungsten carbide. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022;118:1141–1163.
<https://doi.org/10.1007/s00170-021-07885-8>
13. Schwanekamp T., Gussone J., Reuber M. Impact of laser irradiation on microstructure and phase development of tungsten carbide-cobalt. *Procedia CIRP*. 2020;94:239–242.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.045>
14. Yilbas B.S., Arif A.F.M., Karatas C., Ahsan M. Cemented carbide cutting tool: Laser processing and thermal stress analysis. *Applied Surface Science*. 2007;253(12):5544–5552.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.12.123>
15. Яресько С.И. Анализ стойкости и изнашивания твердосплавного инструмента после лазерной термообработки. *Известия СамНЦ РАН*. 2001;3(1):27–37.
Yares'ko S.I. Wear and wear resistance analysis of hard alloy tools after laser treatment. *Izvestiya SamNTs RAN*. 2001;3(1):27–37. (In Russ.).
16. Kresse T., Meinhard D., Bernthaler T., Schneider G. Hardness of WC–Co hard metals: Preparation, quantitative microstructure analysis, structure-property relationship and modeling. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2018;75:287–293.
<https://doi.org/10.1016/j.jrmhm.2018.05.003>
17. Кабалдин Ю.Г., Серый С.В., Кретинин О.В., Лаптев И.Л. Самоорганизация и наноструктурные процессы при резании металлов. Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева; 2014:173.
18. Кабалдин Ю.Г., Кретинин О.В., Серый С.В., Шатагин Д.А. Наноструктурирование контактных поверхностей твердосплавного инструмента при резании. *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. 2012;(4(97)):123–132.
Kabaldin Yu.G., Kretinin O.V., Seryi S.V., Shatagin D.A. Nanostructuring contact surface carbide tools in cutting. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*. 2012;(4(97)):123–132. (In Russ.).
19. Дворник М.И., Михайленко Е.А. Исследование прочности твердого сплава ВК8 методом конечных элементов. *Химическая физика и мезоскопия*. 2009;11(4):433–440.
Dvornik M.I., Mikhailenko E.A. Research of WC-8%Co hard alloy strength by finite elements method. *Chemical Physics and Mesoscopies*. 2009;11(4):433–440. (In Russ.).
20. Brackmann L., Röttger A., Weber S., Theisen W. Subcritical crack growth in hard alloys under cyclic loading. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2021;44(2):349–365. <https://doi.org/10.1111/ffe.13363>
21. Lantsev E.A., Nokhrin A.V., Chuvil'deev V.N., Boldin M.S., Blagoveshchenskiy Yu.V., Andreev P.V., Murashov A.A., Smetanina K.E., Isaeva N.V., Terentev A.V. Study of high-temperature deformation features of ceramics of binderless tungsten carbide with various particle sizes. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2022;13:1324–1332.
<https://doi.org/10.1134/S2075113322050240>
22. Монтик С.В. Влияние технологии механотермического формирования на износостойкость твердого сплава. *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2000;(4):32–35.
Montik S.V. Influence of the mechanothermal formation technology of on wear resistance of a hard alloy. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2000;(4):32–35. (In Russ.).
23. Туманов В.И. Свойства сплавов системы карбид вольфрама-кобальт. Москва: Металлургия; 1971:95.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Сергей Игоревич Яресько, д.т.н., заведующий лабораторией лазерно-индуцированных процессов, Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
ORCID: 0000-0001-5299-886X
E-mail: serg19541959@mail.ru

Сергей Николаевич Балакиров, инженер лаборатории лазерно-индуцированных процессов, Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН
E-mail: s.balakirov@yandex.ru

Татьяна Николаевна Осолкова, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0003-1310-1284
E-mail: osolkova@kuz.ru

Sergei I. Yaresko, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Laser-Induced Processes, Samara Branch of the Lebedev Institute of Physics, Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0001-5299-886X
E-mail: serg19541959@mail.ru

Sergei N. Balakirov, Engineer of the Laboratory of Laser-Induced Processes, Samara Branch of the Lebedev Institute of Physics, Russian Academy of Sciences
E-mail: s.balakirov@yandex.ru

Tat'yana N. Oskolkova, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0003-1310-1284
E-mail: osolkova@kuz.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

С. И. Яреско – разработка концепции исследования, планирование исследований, обобщение и интерпретация результатов исследования, формулирование выводов, подготовка рукописи статьи, лазерная обработка.

С. Н. Балакиров – разработка методики расчета, выполнение расчета, интерпретация полученных результатов, работа с графическим материалом.

Т. Н. Осолкова – проведение металлофизических исследований и интерпретация полученных результатов.

S. I. Yaresko – conceptualization, research planning, generalization and interpretation of results, formulation of conclusions, preparation of the manuscript, laser treatment.

S. N. Balakirov – development of the calculation methodology, calculation, interpretation of results, work with graphic material.

T. N. Oskolkova – metallophysical studies, interpretation of results.

Поступила в редакцию 26.12.2024
После доработки 03.02.2025
Принята к публикации 10.02.2025

Received 26.12.2024
Revised 03.02.2025
Accepted 10.02.2025

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ
ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

INNOVATION IN METALLURGICAL
INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT,
TECHNOLOGIES AND MATERIALS



УДК 621.746+621.771

DOI 10.17073/0368-0797-2025-4-366-371



Оригинальная статья
Original article

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В БОЙКАХ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СТАЛЬНЫХ ПОЛЫХ ЗАГОТОВОК НА УСТАНОВКЕ СОВМЕЩЕННОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ. ЧАСТЬ 1

О. С. Лехов[✉], Д. Х. Билалов

Российский государственный профессионально-педагогический университет (Россия, 620012, Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11)

✉ MXlehov@yandex.ru

Аннотация. В статье решается задача определения температуры калиброванных бойков установки совмещенного литья и деформации при получении стальных полых заготовок. Авторы обосновывают актуальность определения температурных полей и термоупругих напряжений в калиброванных бойках при обжатии стенки поллой заготовки и на холостом ходу при охлаждении бойков водой, приводят прочностные и теплофизические свойства стали, из которой изготовлены бойки. Показана геометрия бойка для получения поллой заготовки за один проход. Приводятся исходные данные для расчета температурного поля бойка установки совмещенного литья и деформации при получении полых заготовок, а также представлены температурные граничные условия для расчета температурных полей бойков. Статья описывает граничные условия для определения температуры бойка и значения теплового потока и эффективного коэффициента теплоотдачи. Результаты расчета температурных полей были выполнены в четырех сечениях для характерных линий и точек, расположенных на контактной поверхности бойка и в приконтактном слое на глубине 5 мм от рабочей поверхности. Размеры сетки конечных элементов приведены для использования при расчете температурного поля бойков. Температурное поле бойков с буртами определялось на основе решения уравнения нестационарной теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями. Представлены величины и закономерности распределения температуры в калиброванном бойке при обжатии стенки поллой заготовки и на холостом ходу при получении за один проход поллой заготовки на установке совмещенного литья и деформации.

Ключевые слова: установка, калиброванные бойки, литье, деформация, кристаллизатор, поллая заготовка, температурное поле, конечный элемент

Для цитирования: Лехов О.С., Билалов Д.Х. Расчет температуры и термоупругих напряжений в бойках при получении стальных полых заготовок на установке совмещенного литья и деформации. Часть 1. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(4):366–371.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-366-371>

CALCULATION OF TEMPERATURE AND THERMOELASTIC STRESSES IN STRIKERS DURING PRODUCTION OF HOLLOW STEEL BILLETS IN A UNIT OF COMBINED CASTING AND DEFORMATION. PART 1

O. S. Lekhov[✉], D. Kh. Bilalov

Russian State Vocational Pedagogical University (11 Mashinostroitelei Str., Yekaterinburg 620012, Russian Federation)

✉ MXlehov@yandex.ru

Abstract. The article solves the problem of determining the temperature of calibrated strikers in a unit of combined casting and deformation during production of hollow steel billets. The authors substantiate the relevance of determining temperature fields and thermoelastic stresses in calibrated strikers when compressing the wall of a hollow billet and at full speed when cooling the strikers with water, and describe the strength and thermo-physical properties of the steel from which the strikers are made. Geometry of the striker for producing a hollow billet in one pass is shown. The paper considers the initial data and temperature boundary conditions for calculating the temperature field of the striker during production of hollow billets in a unit of combined casting and deformation. The boundary conditions are given to determine the striker temperature as well as the values of heat flow and effective heat transfer coefficient. The results of calculating the temperature fields are performed in four sections and are presented for

characteristic lines and points located on the striker contact surface and in the contact layer at a depth of 5 mm from the working surface. Dimensions of the finite element grid were used in calculating the temperature field of the strikers. The temperature field of the strikers with collars was determined based on solution of the unsteady thermal conductivity equation with the corresponding initial and boundary conditions. The values and patterns of temperature distribution in a calibrated striker are presented when the wall of a hollow billet is compressed and when a hollow billet is produced in one pass in a unit of combined casting and deformation.

Keywords: installation, calibrated striker, casting, deformation, mold, hollow billet, temperature field, final element

For citation: Lekhov O.S., Bilalov D.Kh. Calculation of temperature and thermoelastic stresses in strikers during production of hollow steel billets in a unit of combined casting and deformation. Part 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(4):366–371.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-366-371>

ВВЕДЕНИЕ

Технология получения стальных полых заготовок на трубных заводах отличается высокими капитальными, энергетическими и эксплуатационными затратами, поскольку включает литье сплошных круглых заготовок на горизонтальных машинах непрерывной разливки стали, их нагрев в печах и прошивку на прессах или валковых прошивочных станах. Следует отметить, что это оборудование в основном зарубежного исполнения и в условиях антиросийских санкций его поставки могут быть прекращены. В связи с этим разработана отечественная установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации, которая успешно заменяет зарубежное оборудование, ее можно использовать для получения стальных полых заготовок за один проход [1 – 3]. Наиболее нагруженными элементами установки при получении полых заготовок являются калиброванные бойки, которые во время рабочего хода одновременно обжимают стенку полый заготовки и вытягивают ее из кристаллизатора. При этом в калиброванных бойках возникают суммарные напряжения от усилия обжатия и температурной нагрузки, которые снижают стойкость бойков. Для обоснованного выбора конструктивных параметров и материала калиброванных бойков необходимо определить их напряженное состояние при получении полых

заготовок на установке совмещенного литья и деформации. Для этого необходимо определить температурное поле и термоупругие напряжения в бойках при обжатии стенки полый заготовки [4 – 6].

В настоящей работе приведена методика расчета температурных полей и термоупругих напряжений в бойках установки совмещенного литья и деформации. Материал трубной заготовки – сталь марки 09Г2С; внутренний и наружный диаметры трубной заготовки 60 и 100 мм соответственно. Угловая скорость эксцентриковых валов 40 об/мин. При такой скорости время контакта бойка при рабочем ходе составляет 0,375 с, время паузы – $0,375 \cdot 3 = 1,125$ с. Температура трубной заготовки в зоне входа в боек 1200 °С, а после выхода из бойков 1000 °С.

Материал бойка – сталь инструментальная штампованная 4Х4ВМФС. Для расчета для этой стали в интервале температур от 20 до 700 °С принимали модуль упругости E , плотность ρ , теплопроводность λ , теплоемкость c , коэффициент линейного расширения α и предел текучести σ_t [2].

Геометрия бойка с размерами представлена на рис. 1.

В силу симметрии расчет выполняли для половины бойка (рис. 2). Приведена часть видимых линий, для которых будут ниже приведены результаты расчета.

Результаты расчета температур и напряжений приведены для трех сечений (1, 2 и 3), в каждом сечении

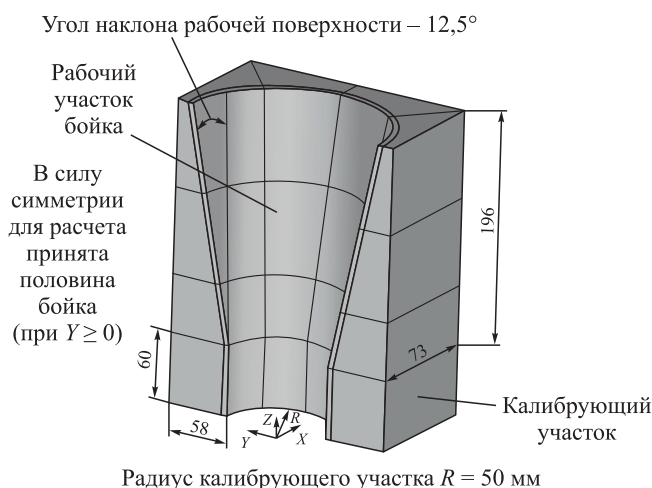


Рис. 1. Геометрия бойка с размерами

Fig. 1. Geometry of the striker with dimensions

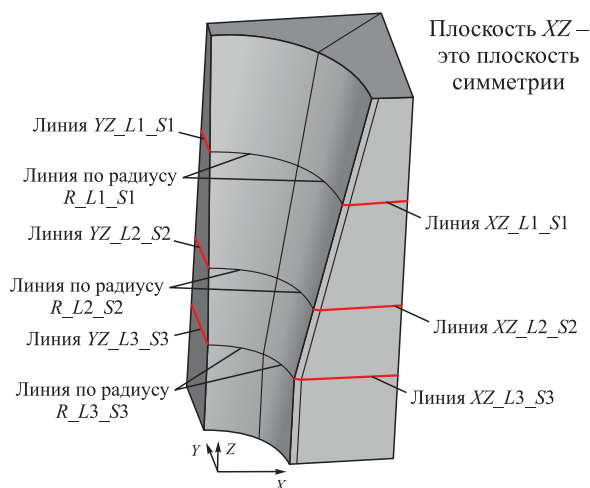


Рис. 2. Геометрия половины бойка (часть видимых линий)

Fig. 2. Geometry of one half of the striker (part of the visible lines)

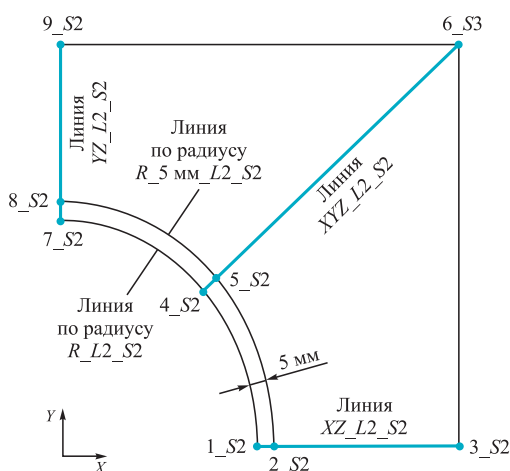


Рис. 3. Положение точек и линий в сечении 2 (сечения указаны на рис. 2)

Fig. 3. Position of points and lines in section 2 (sections are shown in Fig. 2)

результаты представлены для пяти линий. Положение сечений, линий для каждого сечения, а также точек, через которые проходят линии по этим сечениям, представлены на рис. 3. В табл. 1 приведены наименования всех линий, а также указаны точки, через которые проходят эти линии.

Расчеты теплового и напряженного состояний бойков для каждой тепловой нагрузки (граничных условий теплообмена), заданных теплофизических и механических свойств материала бойков, а также геометрии бойков выполняли в следующей последовательности:

1. При принятом тепловом элементе SOLID 70, заданных граничных условиях теплообмена и теплофизических параметрах (плотности, теплопроводности, теплоемкости) материала бойка определяли квазиустановившееся температурное поле бойка в конце обжатия и в конце паузы [7 – 9].

2. При принятом структурном элементе SOLID 185, модуле упругости и коэффициенте Пуассона, а также температурном поле в конце рабочего хода (из решения задачи на первом этапе) определяли термонапряженное состояние бойка в конце рабочего хода в направлении длины бойка [10 – 12].

Температурное поле бойков определяется на основе решения уравнения нестационарной теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями с использованием пакета ANSYS [10]:

$$c\rho \frac{dT}{dt} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right), \quad (1)$$

Все коэффициенты принимаем в зависимости от температуры бойков.

Начальное условие для функции $T(\vec{X}, t)$ имеет вид:

$$T(\vec{X}, t) = T_0(\vec{X}). \quad (2)$$

Начальная температура бойков 20 °С.

Для рабочей поверхности бойка граничные условия второго рода

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s (t) = q, \quad (3)$$

где q – плотность теплового потока от металла очага деформации.

В период паузы для рабочей поверхности бойка граничные условия третьего рода имеют вид

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha_1 (T - T_k), \quad (4)$$

где α_1 – эффективный коэффициент теплоотдачи на рабочую поверхность во время паузы; $T_k = 60$ °С – температура воды, подающейся на рабочую поверхность бойков во время паузы.

На торце бойка, задней стенке, сверху и снизу бойка граничные условия третьего рода имеют вид

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha_2 (T - T_b), \quad (5)$$

где α_2 – коэффициент теплоотдачи при охлаждении задней стенки, верха и низа бойка водой или воздухом в зависимости от варианта расчета; $T_b = 60$ °С – температура окружающей среды со стороны торца бойка, задней стенки, верха и низа бойка.

Таблица 1. Наименования линий для трех сечений, точки, через которые проходят эти линии

Table 1. Names of the lines for three sections, the points through which these lines pass

Линия	Точки	Линия	Точки	Линия	Точки
Сечение 1		Сечение 2		Сечение 3	
XZ_L1_S1	1_S1, 2_S1, 3_S1	XZ_L2_S2	1_S2, 2_S2, 3_S2	XZ_L3_S3	1_S3, 2_S3, 3_S3
XYZ_L1_S1	4_S1, 5_S1, 6_S1	XYZ_L2_S2	4_S2, 5_S2, 6_S2	XYZ_L3_S3	4_S3, 5_S3, 6_S3
YZ_L1_S1	7_S1, 8_S1, 9_S1	YZ_L2_S2	7_S2, 8_S2, 9_S2	YZ_L3_S3	7_S3, 8_S3, 9_S3
R_L1_S1	1_S1, 4_S1, 7_S1	R_L2_S2	1_S2, 4_S2, 7_S2	R_L3_S3	3_S3, 4_S3, 7_S3
R_5mm_L1_S1	2_S1, 5_S1, 8_S1	R_5mm_L2_S2	2_S2, 5_S2, 8_S2	R_5mm_L3_S3	2_S3, 5_S3, 8_S3

В такой постановке одним из допущений является то, что при расчете температурных полей бойков пренебрегаем тепловым потоком от излучаемого металла [13 – 15].

Уравнения (1) – (5) образуют начальную краевую задачу определения нестационарного поля температур для бойков установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации [16 – 18].

Такая схема определения температуры и термоупругих напряжений в бойках установки методом конечных элементов реализована в одном из модулей пакета ANSYS [19; 20].

Значения температур во всех точках линий приведены в табл. 2.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

От воздействия теплового потока во время обжатия заготовки температура контактной поверхности бойка составляет 370 – 451 °С (результаты представлены только для части бойка между сечениями 1 – 3, табл. 1, точки 7_S3 и 1_S1). Максимум температуры находится в сечении 1 на плоскости симметрии бойка. Далее на холостом ходу при охлаждении бойка водой температура контактной поверхности бойка снижается и находится в диапазоне 289 – 370 °С (точки 7_S3 и 1_S1). Максимум температуры находится в сечении 1 на плоскости симметрии бойка.

На глубине 5 мм температуры в конце контакта и в конце паузы при квазиустановившемся режиме одинаковые и зависят только от места положения, диапазон температур 295 – 392 °С (точки 8_S3 и 2_S1). Максимум температуры находится в сечении 1 на плоскости симметрии бойка.

Характер изменения температур как по толщине бойка, так и по радиусу подобен. Максимум температур

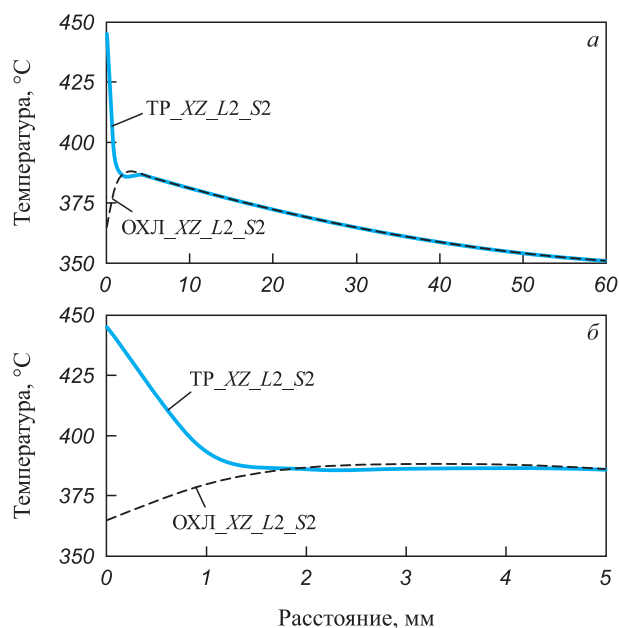


Рис. 4. Характер температур вдоль линии XZ_L2_S2 в зависимости от воздействия на боек теплового потока (TP) и охлаждения водой (OXЛ) по толщине бойка (а) и от поверхности контакта на глубине 5 мм (б)

Fig. 4. Nature of temperatures along the XZ_L2_S2 line due to the effect of heat flow (TP) and cooling with water (OXЛ) on the striker along its thickness (a) and from the contact surface to a depth of 5 mm (b)

в контакте и в паузе на рабочей поверхности бойка и на глубине 5 мм находится в части бойка, расположенной ближе к кристаллизатору; к калибрующему участку температура снижается. Изменение температуры по радиусу: максимум на плоскости симметрии; снижение к боковой поверхности бойка.

Температура бойка по толщине уменьшается, на поверхности со стороны суппорта составляет

Таблица 2. Значения температур во всех точках линий

Table 2. Temperature values at all points of the lines

Сечение 1			Сечение 2			Сечение 3		
Точка	Температура, °C		Точка	Температура, °C		Точка	Температура, °C	
	OXЛ	TP		OXЛ	TP		OXЛ	TP
1_S1	370	451	1_S2	365	445	1_S3	354	435
2_S1	392	392	2_S2	386	386	2_S3	373	373
3_S1	370	370	3_S2	350	350	3_S3	310	310
4_S1	368	448	4_S2	360	441	4_S3	348	429
5_S1	389	389	5_S2	381	381	5_S3	366	366
6_S1	344	344	6_S2	330	330	6_S3	285	285
7_S1	304	385	7_S2	294	375	7_S3	289	370
8_S1	314	314	8_S2	302	302	8_S3	295	295
9_S1	286	286	9_S2	252	252	9_S3	221	221

Примечание. OXЛ и TP – температура в конце паузы и в конце рабочего хода.

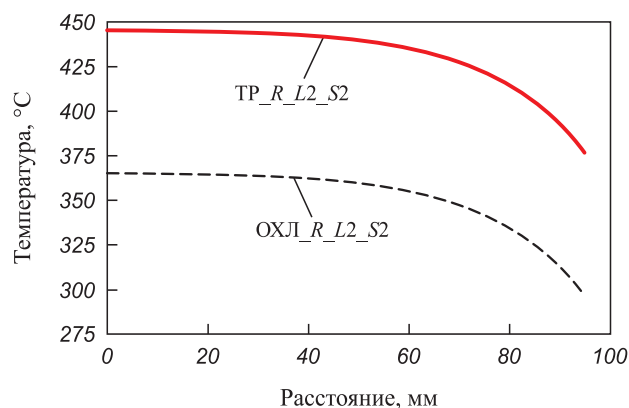


Рис. 5. Характер температур вдоль линии R_L2_S2 в зависимости от воздействия на боек теплового потока (ТР) и охлаждения водой (ОХЛ)

Fig. 5. Nature of temperatures along the R_L2_S2 line due to the effect of heat flow (TP) and cooling with water (ОХЛ) on the striker

285 – 370 °С (точки 6_С3 и 3_С1). Со стороны боковой поверхности бойка температура составляет 221 – 286 °С (точки 9_С3 и 9_С1).

Выравнивание температур наступает на глубине 2 мм от контактной поверхности бойка, что имеет место как по толщине бойка, так и по его радиусу.

На рис. 4 и 5 показано распределение температуры по характерным линиям калиброванного бойка в сечении 2 при обжатии заготовки и на холостом ходу при охлаждении бойка водой. Следует отметить, что температуры в характерных точках сечений 1 и 2 бойка отличаются незначительно (табл. 2).

Выводы

Разработана методика расчета температурных полей и термоупругих напряжений в калиброванных бойках установки совмещенного литья и деформации при получении стальных трубных заготовок. Определено распределение температур по характерным линиям калиброванного бойка при обжатии заготовки и на холостом ходу при охлаждении бойка водой. Установлено, что от воздействия теплового потока во время обжатия заготовки температура контактной поверхности бойка составляет 370 – 451 °С.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Лехов О.С., Михалев А.В. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства листов из стали для сварных труб. Теория и расчет. Екатеринбург: изд. УМЦ УПИ; 2017:151.
2. Лехов О.С., Михалев А.В., Шевелев М.М. Напряжения в системе бойки – полоса при получении листов из стали на установке непрерывного литья и деформации. Екатеринбург: изд. УМЦ УПИ; 2018:125.
3. Лехов О.С., Билалов Д.Х. Технологические возможности установок совмещенных процессов непрерывного литья

и деформации для производства металлопродукции. *Производство проката*. 2016;(7):24–26.

Lekhov O.S., Bilalov D.Kh. Technological capabilities of installations for combined continuous casting and deformation processes for the production of metal products. *Proizvodstvo prokata*. 2016;(7):24–26. (In Russ.).

4. Хлопонин В.Н., Косырева М.В., Косяк А.С. Влияние системы охлаждения на тепловые условия работы поверхностного слоя вала. В кн.: *Труды МИСиС. Вып. 100*. Москва: изд. МИСиС; 1977:90–93.
5. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. Москва: Мир; 1976:349.
6. Лехов О.С. Исследование напряженно-деформированного состояния системы вальки – полоса при прокатке широкополочной балки в клетях универсально-балочного стана. Сообщение 2. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2014;57(12):15–19.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-12-15-19>
- Lekhov O.S. Study of stress-strain state of rolls-band system at rolling of broad-flanged beam in stands of universal beam mill. Report 2. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014;57(12):15–19. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-12-15-19>
7. Кушнер В.С., Верещака А.С., Схиртладзе А.Г., Негров Д.А. Технологические процессы в машиностроении Ч. II. Обработка металлов давлением и сварочное производство. Омск: изд. ОмГТУ; 2005:200.
8. Буланов Л.В., Карлинский С.Е., Волегова В.Е. Долговечность роликов МНЛЗ при наружном и внутреннем охлаждении. В кн.: *Надежность крупных машин. Сб. науч. тр. НИИтяжмаш*. Свердловск: изд. НИИтяжмаш; 1990:126–132.
9. Лыков А.В. Теория теплопроводности. Москва: Высшая школа; 1967:600.
10. ANSYS. Structural Analysis Guide. Rel. 15.0.
11. Matsumia T., Nakamura Y. Mathematical model of slab bulging during continuous casting. In: *Applied Mathematical, and Physical Models in Iron and Steel Industry: Proceedings of the 3rd Process. Tech. Conf., Pittsburgh, Pa, 28-31 March 1982*. New York; 1982:264–270.
12. Takashima Y., Yanagimoto I. Finite element analysis of flange spread behavior in H-beam universal rolling. *Steel Research International*. 2011;82(10):1240–1247.
<https://doi.org/10.1002/srin.201100078>
13. Kobayashi S., Oh S.-I., Altan T. Metal Forming and Finite-Element Method. New York: Oxford University Press; 1989:377.
14. Karrech A., Seibi A. Analytical model of the expansion in of tubes under tension. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010;210:336–362.
15. Kazakov A.L., Spevak L.F. Numeral and analytical studies of nonlinear parabolic equation with boundary conditions of a special form. *Applied Mathematical Modelling*. 2013; 37(10-13):6918–6928.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.02.026>
16. Jansson N. Optimized sparse matrix assembly in finite element solvers with one-sided communication. In: *High Performance Computing for Computational Science – VECAPAR 2012*. Berlin, Heidelberg: Springer; 2013:128–139.
17. Park C.Y., Yang D.Y. A study of void crushing in large forgings II. Estimation of bonding efficiency by finite-element

- analysis. *Journal of Materials Processing Technology*. 1997;72(1):32–41.
18. Sorimachi K., Emi T. Elastoplastic stress analysis of bulging as a major cause of internal cracks in continuously cast slabs. *Tetsu-to-Hagane*. 1977;63(8):1297–1304. https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.63.8_1297
19. Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Oxford: Butterworth-Heinemann Elsevier Ltd.; 2002:228.
20. Fujii H., Ohashi T., Hiromoto T. On the formation of the internal cracks in continuously cast slabs. *Tetsu-to-Hagane*. 1978;18(8): 510–518. https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.62.14_1813

Сведения об авторах

Information about the Authors

Олег Степанович Лехов, д.т.н., профессор кафедры инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии, Российский государственный профессионально-педагогический университет

E-mail: MXLehov38@yandex.ru

Дамир Харасович Билалов, доцент кафедры инжиниринга и профессионального обучения в машиностроении и металлургии, Российский государственный профессионально-педагогический университет

ORCID: 0000-0002-4336-5339

E-mail: master_ddd@mail.ru

Oleg S. Lekhov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Engineering and Vocational Training in Machinery and Metallurgy, Russian State Professional Pedagogical University

E-mail: MXLehov38@yandex.ru

Damir Kh. Bilalov, Assist. Prof. of the Chair of Engineering and Vocational Training in Machinery and Metallurgy, Russian State Professional Pedagogical University

ORCID: 0000-0002-4336-5339

E-mail: master_ddd@mail.ru

Поступила в редакцию 16.09.2024

После доработки 27.09.2024

Принята к публикации 25.12.2024

Received 16.09.2024

Revised 27.09.2024

Accepted 25.12.2024



УДК 539.5;621.74

DOI 10.17073/0368-0797-2025-4-372-382



Оригинальная статья
Original article

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ШВОВ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ СФЕРИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ

А. И. Евстигнеев[✉], Д. В. Чернышова, В. И. Одинокоев, Э. А. Дмитриев,
А. А. Евстигнеева, Ю. Б. Колошенко, Д. А. Потянихин

Комсомольский-на-Амуре государственный университет (Россия, 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27)

✉ diss@knastu.ru

Аннотация. Задачей настоящего теоретического исследования является оценка влияния кольцевых температурных швов на внутренней поверхности литейной металлической сферической формы на уровень напряженно-деформированного состояния (НДС) в ней при кристаллизации стальной отливки. Специфика данного технологического процесса состоит в геометрической форме (сфера) литейной модели, когда кристаллизующийся металл создает во внутренней поверхности литейной формы (в первые мгновения) значительные сжимающие напряжения, которые усиливаются кривизной формы: внутренний слой формы, нагреваясь, пытается увеличиться в объеме, но этому препятствуют не только более холодные внешние слои, но и кривизна самого поверхностного слоя. Рассматриваются два варианта применения литейной формы: со швами и без них. Формулируется задача оптимизации конструктивных параметров температурных швов (выточек) от величины возникающих в литейной форме нормальных напряжений в начальной стадии кристаллизации стальной отливки. При решении задачи используются уравнения линейной теории упругости, уравнения теплопроводности и апробированный численный метод. Приведена численная схема и разработанный алгоритм решения задачи. Оценка трещиностойкости проводится по величине нормальных напряжений в металлической сферической форме. Найденные в результате решения тестовой задачи оптимальные конструктивные варианты (схемы) литейной сферической металлической формы зависят от расположения температурных швов в оболочковой форме, значений напряжений в них в условиях целевой функции min-max и разработанного алгоритма. Результаты решения задачи представлены графически в виде эпюр напряжений и температур по исследуемой области в разных сечениях и временах охлаждения ОФ и нарастающей корочки металла. Дан анализ полученных результатов стойкости металлической сферической литейной формы.

Ключевые слова: металлическая литейная форма, отливка, напряженно-деформированное состояние, моделирование, оптимизация

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00214, <https://rscf.ru/project/24-29-00214/>.

Для цитирования: Евстигнеев А.И., Чернышова Д.В., Одинокоев В.И., Дмитриев Э.А., Евстигнеева А.А., Колошенко Ю.Б., Потянихин Д.А. Моделирование и оптимизация влияния температурных швов на напряженно-деформированное состояние сферических металлических литейных форм. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(4):372–382. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-372-382>

MODELING AND OPTIMIZATION OF THE EFFECT OF TEMPERATURE SEAMS ON STRESS-STRAIN STATE OF SPHERICAL METAL CASTING MOLDS

A. I. Evstigneev[✉], D. V. Chernyshova, V. I. Odínokov, E. A. Dmitriev,
A. A. Evstigneeva, Yu. B. Koloshenko, D. A. Potyanikhin

Komsomolsk-on-Amur State University (27 Lenina Ave., Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk Territory 681013, Russian Federation)

✉ diss@knastu.ru

Abstract. The objective of this theoretical study is to evaluate the effect of annular temperature seams in the inner surface of a spherical metal casting mold on the level of stress-strain state (SSS) in it during crystallization of a steel casting. The specificity of this technological process consists in the geometric shape (sphere) of the casting model, when the crystallizing metal creates significant compressive stresses in the inner surface of the mold (in the first moments), which are enhanced by the mold curvature: the mold inner layer, heating up, tries to increase in volume, but this is prevented not only by the cooler outer layers, but also by curvature of the surface layer itself. Two possible applications of the casting mold are being considered: with and without seams. The problem of optimizing the design parameters of temperature seams (recesses) is formulated. It depends on the magnitude of the normal stresses occurring in the casting mold at the initial stage of the steel casting crystallization. When solving the problem, the equations of the linear theory of elasticity, the equations of thermal conductivity and the proven numerical method are used. The paper presents a numerical scheme and a developed algorithm for solving the problem. Crack resistance was estimated based on the magnitude of normal stresses in a spherical metal mold. The optimal design options (schemes) of a spherical metal casting mold found as a result of solving the test problem depend on location of the temperature seams in the shell mold, the stress values in them under conditions of the min-max objective function and the developed algorithm. The results of solving the problem are presented graphically in the form of plots of stresses and temperatures in the studied area in different sections and periods of cooling of the shell mold and the metal growing crust. The obtained results of resistance of a metal spherical casting mold were analyzed.

Keywords: metal casting mold, casting, stress-strain state, modeling, optimization

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 24-29-00214, <https://rscf.ru/project/24-29-00214/>.

For citation: Evstigneev A.I., Chernyshova D.V., Odínokov V.I., Dmitriev E.A., Evstigneeva A.A., Koloshenko Yu.B., Potyanikhin D.A. Modeling and optimization of the effect of temperature seams on stress-strain state of spherical metal casting molds. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025; 68(4):372–382. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-372-382>

ВВЕДЕНИЕ

Металлические литейные формы широко применяются в литейном производстве в различных методах литья, например, при литье в кокиль, центробежном литье, литье под давлением, непрерывном литье, жидкой штамповке и др. Основным недостатком этих методов литья является малая долговечность работы металлических форм вследствие внешних силовых и температурных воздействий на них. Такие воздействия приводят к повышенному уровню напряженно-деформированного состояния (НДС) в формах, которые могут разрушаться, или к нарушению геометрии формы от возникающих температурных напряжений. Для снижения такого влияния в производстве применяют различные технологические и конструктивные решения.

Как показывает анализ литературных источников и производственный опыт, на стойкость литейных форм большое влияние оказывает геометрия получаемой в ней отливки. Наиболее непредсказуемой (с точки зрения стойкости литейной формы) является сферическая (шарообразная) форма отливки.

В действующем литейном производстве шарообразных отливок применяются различные типы литейных форм, а именно, разовые песчано-глинистые, керами-

ческие и разъемные металлические. Такие литейные формы подвергаются различным внешним силовым и температурным воздействиям, которые могут приводить к разрушению форм или сокращению их работоспособности.

Авторами работы [1] высказано теоретическое предположение и найдено принципиально новое технологическое решение¹ по повышению стойкости сферической керамической оболочковой формы (ОФ) за счет выполнения на ее внутренней поверхности температурных швов. Идея такого технологического решения найдена в результате анализа известного в литейном производстве метода снижения термических напряжений в отливках за счет использования так называемых «ребер жесткости» [2], а в рассматриваемом случае – температурных швов (выточек). Температурный шов представляет собой кольцевую выточку на внутренней поверхности литейной ОФ.

Эволюция НДС металлической литейной формы при литье в кокиль рассматривается в работах [3; 4].

¹ Пат. № 2828801 Литейная многослойная оболочковая форма / В.И. Одинок, А.И. Евстигнеев, Э.А. Дмитриев, Д.В. Чернышова, Ю.И. Ткачева, А.Н. Намоконов Заявл. 05.03.2024; опубли. 21.10.2024. Бюл. № 30.

Расчет НДС кокилей осуществляется методом конечных элементов [3] в два этапа: решение задачи теплопроводности и решение задачи упруго-пластической деформации с использованием найденных температурных полей. Расчетные данные позволили спроектировать и внедрить в производство новые, более стойкие чугунные изложницы меньшей массы.

В работе [4] представлены данные по численному моделированию процессов формирования отливок в металлических формах. В качестве методической основы численного моделирования принят метод конечных разностей в варианте явной разностной схемы. Для реализации метода численного моделирования явлений теплопереноса в рассматриваемой системе тел использовалась прямоугольная пространственная сетка в пределах поддона. Шаги сетки в пределах формирующейся отливки, а также для стенки формы и слоя утеплителя сочетались с теплофизическими свойствами поддона для обеспечения условий гомохромности. Устойчивость расчета сохранялась благодаря принятому шагу по времени $\Delta t \leq 30$ с, при котором число Фурье не превышает своего граничного значения. Задача решалась как двумерная.

Результаты моделирования НДС в затвердевающей стальной отливке [5; 6] позволили спрогнозировать образование в ней трещин, развитие которых зависит не только от температурных полей и связанных с ними тепловых напряжений и деформаций, но и от локализации усадочной пористости.

В работе [7] получено общее выражение, позволяющее рассчитать усадку и термические напряжения в упруго-пластическом диске, обусловленные круговым источником тепла, для произвольного нелинейного закона упрочнения, а также рассчитать упругую разгрузку упруго-пластического диска.

В работе [8] изучены упруго-пластические и остаточные напряжения в толстостенном сферическом сосуде под внешним гидростатическим давлением. В результате исследований был разработан процесс, позволяющий создавать благоприятные остаточные напряжения при сжатии во внутренней части цилиндрических и сферических сосудов.

Предметом работы [9] была функционально-градиентная полая сфера со сферической изотропией, подверженная внутреннему давлению. Целью работы являлась реализация благоприятного распределения напряжений в полой сфере, подверженной внутреннему давлению, для пластичного и хрупкого поведения материала.

В работе [10] рассмотрена переходная термоупругая задача, включающая многослойный полый цилиндр с кусочно-степенной неоднородностью из-за асимметричного нагрева с его поверхностей. Было исследовано влияние функциональной градации на термические напряжения.

Решалась численная задача в программном комплексе ANSYS Mechanical для двухслойной толстостен-

ной сферической оболочки при температурно-силовом воздействии [11].

Решение задачи для напряжений и смещений в толстой сферической оболочке, подверженной внутренним и внешним нагрузкам давления, представлено в работе [12].

На основе теории плоской упругости определены компоненты смещения и напряжения в толстостенных сферических сосудах высокого давления, изготовленных из неоднородных материалов, подвергающихся внутреннему и внешнему давлению [13]. Исследуется влияние неоднородности материала на упругие деформации и напряжения.

Оптимизация конструкции для трехслойного цилиндра с термоусадкой из разных материалов, подвергающегося очень высокому давлению, исследовалась в работе [14].

В работе [15] проведено моделирование осесимметричной многослойной оболочки. Решена задача о плоской деформации для цилиндра, окруженного кольцевыми слоями. Показано численное решение для изучения зависимости распределения остаточных напряжений от свойств материала в процессе охлаждения.

В работе [16] исследовано влияние величины угла охвата поверхности сферической керамической ОФ опорным наполнителем (ОН) на уровень НДС в ней при получении стальной шарообразной отливки. Сформулирована задача по оптимизации стойкости сферической керамической ОФ от угла охвата ее ОН при затвердевании и охлаждении в ней стальной шарообразной отливки в условиях целевой функции $\min - \max$. Оценка трещиностойкости ОФ проводилась по величине нормальных напряжений в ней.

Для теоретического моделирования процесса эволюции НДС в форме на начальном этапе процесса охлаждения использованы уравнения линейной теории упругости, уравнения теплопроводности и апробированный численный метод [17], который широко применяется для решения других задач подобного рода.

Моделирование и оптимизация смежных вопросов в других различных процессах исследовались в работах [18; 19].

Целью работы [18] является создание эффективного численного алгоритма решения осесимметричных обратных задач проектирования средств тепловой маскировки (многослойных сферических маскировочных оболочек) и анализ результатов проведенных вычислительных экспериментов. В качестве процедуры численной оптимизации при решении данных задач применен оптимизационный метод роя частиц, предложенный в работе [20].

В работе [19] исследуется вопрос о пластической неустойчивости тонкостенного сферического сосуда из материала с пластической ортотропией, нагруженного внутренним импульсным давлением. С использо-

ванием программного обеспечения Mathematica установлено влияние скорости деформации и параметра пластической ортотропии на значение деформации, при котором возникает неустойчивость.

В настоящей работе анализируется стойкость сферической металлической литейной формы при кристаллизации в ней стальной отливки, а именно, развивается найденное ранее для керамических сферических ОФ технологическое решение уменьшения величины нормальных напряжений (по модулю) в сечении сферической ОФ путем упорядоченного расположения в ней выточек. Решается задача по нахождению оптимальной конструкции металлической формы сферической конфигурации, способной выдержать температурный перепад на начальном этапе процесса охлаждения при заливке в нее жидкой стали. Стойкость формы такой конфигурации имеет большое значение при изготовлении шарообразных отливок, применяемых в многочис-

ленных конструкциях и имеющих высокие требования к точности изготовления.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается осесимметричное тело вращения (рис. 1), имеющее в меридианном сечении: *I* – жидкую фазу (сталь); *II* – твердую фазу (закристаллизовавшийся металл); *III* – литейную металлическую форму с кольцевыми выточками на внутренней поверхности; *IV* – опорную конструкцию (ОК). Форма разъемная с внутренними кольцевыми выточками. Жидкий металл заливается в полость литейной формы сверху через литниковую воронку (ЛВ). Вид *A* – эскиз круговой выточки во внутреннем слое формы с соответствующими поверхностями, по которым будут установлены граничные условия.

Представленная ниже расчетная схема адекватно соответствует реальному технологическому процессу получения сферической стальной отливки в металлической форме.

Поскольку решается задача Коши, то физический фактор отвода тепла при охлаждении может быть осуществлен любым известным технологическим способом, например, естественным или принудительным охлаждением и т. п.

Рассмотрим вариант с двумя выточками на внутренней поверхности формы (рис. 2). Требуется найти такое рациональное их расположение на внутренней поверхности, чтобы наибольшие (по модулю) значения нормальных напряжений σ_{22} были бы минимальны.

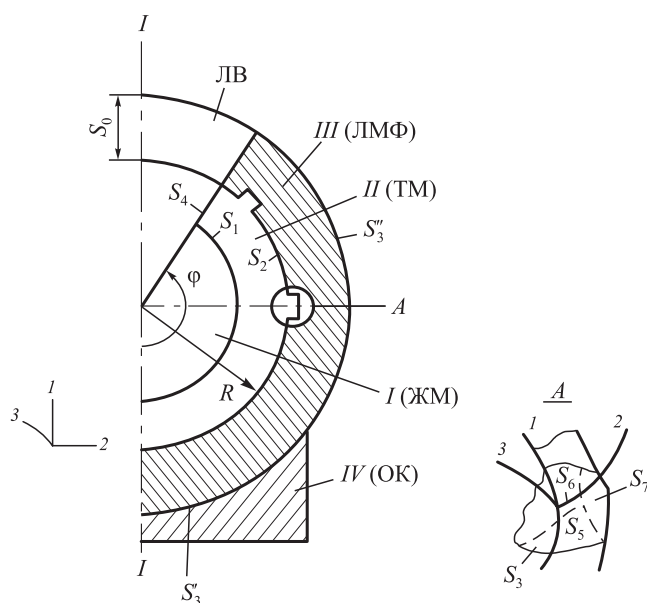


Рис. 1. Расчетная схема системы с указанием поверхности к граничным условиям задачи:

- S_1 – поверхность контакта жидкого и затвердевшего металла;
- S_2 – внутренняя поверхность контакта затвердевшего металла и металлической формы; S_3' – внешняя поверхность металлической формы контакта с опорной конструкцией (ОК);
- S_3'' – внешняя поверхность металлической формы контакта с окружающей средой;
- I* – жидкий металл (ЖМ); *II* – твердый металл (ТМ);
- III* – литейная металлическая форма (ЛМФ);
- IV* – опорная конструкция (ОК); ЛВ – литниковая воронка

Fig. 1. Calculation scheme of the system with indication of the surface to the boundary conditions of the problem:

- S_1 – contact surface of the liquid and solidified metal;
- S_2 – inner contact surface of the solidified metal and the metal mold;
- S_3' – outer surface of the metal mold in contact with the support structure (OK); S_3'' – outer surface of the metal mold in contact with the environment;
- I* – liquid metal (ЖМ); *II* – solid metal (ТМ);
- III* – metal casting mold (ЛМФ);
- IV* – support structure (ОК); ЛВ – funnel

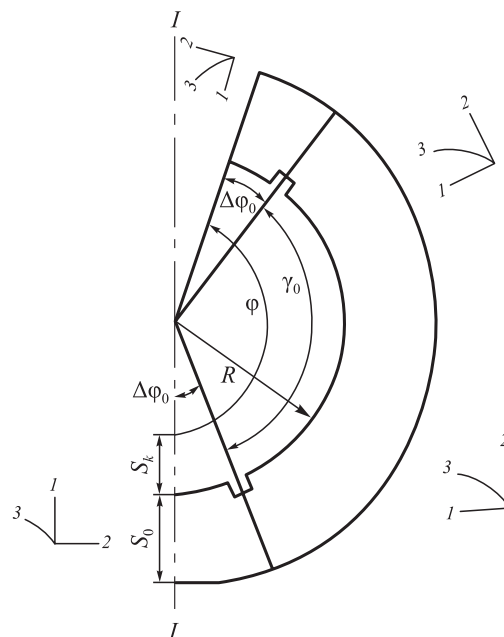


Рис. 2. Схема системы *I* (ЖМ) – *II* (ТМ) – *III* (ЛМФ) к оптимизации конструкции с двумя выточками на внутренней поверхности формы

Fig. 2. Scheme of the system *I* (ЖМ) – *II* (ТМ) – *III* (ЛМФ) for optimizing the structure with two recesses on the mold inner surface

Для этого условия целевая функция будет иметь вид:

$$F = \min |\sigma_{22}(\gamma)| \max \left| \sigma_{22} \left(Q|_{S_2}, \tau \right) \right| \quad (1)$$

при ограничениях

$$\begin{aligned} 0 \leq \gamma_0 \leq 120^\circ; \\ 0 < \tau \leq 15 \text{ с}; \end{aligned} \quad (2)$$

здесь Q – площадь меридианного сечения формы.

Ограничение по τ взято из решения подобной задачи, когда при охлаждении жидкого металла в форме без выточек напряжения σ_{22} , σ_{33} по сечениям уменьшаются по модулю уже при $\tau > 10$ с. Ограничение по углу раствора γ_0 следует из условия, что уменьшение сжимающих напряжений σ_{22} при наличии выточки распространяется на ограниченную область.

Центральную роль в задаче занимает решение системы уравнений линейной теории упругости на временном шаге $\bar{\Delta}\tau_n$.

Используя уравнения линейной теории упругости, запишем для каждой из областей систему уравнений в декартовой системе координат:

– область I (жидкий металл):

$$\begin{aligned} \sigma_{11} = \sigma_{22} = \sigma_{33} = \sigma = -P_1; \\ \dot{\theta} = a_1 \Delta \theta; \end{aligned} \quad (3)$$

– области II , III (закристаллизовавшийся твердый металл, форма):

$$\begin{cases} \sigma_{ij,j} = 0, \quad i; \\ \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2G_p \varepsilon_{ij}^*; \quad \varepsilon_{ij}^* = \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon \delta_{ij}; \\ \varepsilon = \varepsilon_{ii}; \\ \varepsilon_{ii} = 3k_p \sigma + 3\alpha_p (\theta - \theta_p^*); \\ \varepsilon_{ij} = 0,5 (U_{i,j} + U_{j,i}); \\ \dot{\theta} = a_p \Delta \theta, \end{cases} \quad (4)$$

где U_i – перемещения; ε_{ij} – деформации; σ – гидростатическое напряжение; $p = I, II, III$ – рассматриваемые области; $G_p(\theta)$ – модуль сдвига в области p ($p = II, III$); G_p ($p = II, III$) – модуль сдвига металла ($p = II$) и формы ($p = III$); δ_{ij} – символ Кронекера; k_p – коэффициенты объемного сжатия; α_p – коэффициенты линейного расширения ($p = II, III$); a_p – коэффициенты теплопроводности ($p = I, II, III$); θ – текущая температура; τ – время; θ_p^* – начальные температуры в области $p = I, II, III$; P_1 – давление в области I ; $a_p = \frac{\lambda_p}{c_p \gamma_p}$;

λ_p – коэффициент теплопроводности; c_p – коэффициент теплоемкости; γ_p – удельный вес; Δ – оператор Лапласа.

В процессе охлаждения жидкого металла при условии, что $\theta_m \leq \theta_k$ (где θ_m – температура металла; θ_k –

температура кристаллизации), определяется толщина затвердевшего слоя из решения межфазового перехода:

$$\frac{d\theta_1}{dn} \lambda_1 - \frac{d\theta_2}{dn} \lambda_2 = \frac{dx}{d\tau} L \rho, \quad (5)$$

где θ_1 и θ_2 – температура твердой и жидкой фаз; λ_1 и λ_2 – коэффициент теплопроводности твердой и жидкой фазы; L – скрытая теплота плавления; ρ – плотность твердой фазы; x – текущая толщина корочки затвердевшего металла; n – нормаль к границе двух фаз.

Если предположить, что температура в твердой фазе по толщине δx_n изменяется по линейному закону и градиент температуры в жидкой фазе равен нулю, то решение уравнения (5) дает следующую зависимость для определения толщины закристаллизовавшейся корочки δx_n на временном шаге $\bar{\Delta}\tau_n$ [21]:

$$\delta x_n = C \sqrt{\tau}; \quad C = \sqrt{\frac{2 \bar{\Delta}\theta_1 \lambda_1}{\rho L}}; \quad (6)$$

здесь $\bar{\Delta}\theta_1$ – перепад температур в твердой фазе вблизи фронта кристаллизации.

Начальные условия задачи (3), (4):

– $\delta x|_{\tau=0} = 0$ – отсутствие твердой фазы металла;

– $\theta_1|_{\tau=0} = \theta_0$ – температура разливаемого жидкого металла (1500 °C);

– $\theta_3^*|_{\tau=0} = \theta^*$ – начальная температура формы (20 °C).

Начальные значения напряжений равны нулю.

Решение системы (3), (4) осуществляется в ортогональной системе координат. Задача осесимметричная:

$$U_3 = 0; \quad \sigma_{31} = \sigma_{32} = 0; \quad \varepsilon_{31} = \varepsilon_{32} = 0.$$

Граничные условия задачи (3, 4) (рис. 1):

– на оси симметрии

$$U_2 = 0; \quad \sigma_{21} = 0; \quad q_n = 0;$$

– на поверхностях $S_1 - S_8$

$$\sigma_{11}|_{S_1} = -P_1; \quad \sigma_{12}|_{S_i} = 0 \quad (i = 1, 5, 6);$$

$$\sigma_{11}|_{S_3^*} = 0; \quad \sigma_{11}|_{S_i} = 0 \quad (i = 5, 6);$$

$$\sigma_{12}|_{S_3} = 0; \quad \sigma_{22}|_{S_i} = 0 \quad (i = 7, 8); \quad (7)$$

$$U_1|_{S_3} = 0; \quad U_2|_{S_4} = 0; \quad \sigma_{21}|_{S_i} = 0 \quad (i = 4, 7, 8);$$

$$\theta|_{S_1} = \theta_0; \quad \theta|_{S_3} = \theta^*,$$

где q_n – тепловой поток; $S_3 = S_3' + S_3''$ – поверхности соприкосновения формы с опорной конструкцией и свободной поверхностью.

Для решения системы уравнений (3), (4) с граничными условиями (7) использован численный метод, описанный в работе [17] и примененный в исследова-

ниях [21; 22] и др. Рассматриваемая область разбивается системой ортогональных поверхностей на элементы конечных размеров, для каждого элемента записывается система (3), (4) в разностной форме через значения напряжений и перемещений по граням элементов и длин дуг ребер, образующих элемент, которая решается с учетом начальных и граничных условий по разработанной в работе [17] методике и составленному алгоритму. Результаты решения: напряжения и перемещения по граням каждого элемента и средняя температура по каждому элементу на временном шаге. Численное решение задачи осуществлялось с использованием разработанной программы и программного комплекса «Одиссей»².

Разностный аналог уравнения теплопроводности для ортогонального элемента строится из теплового баланса [17] и включает среднюю температуру по элементу и температуры окружающих его элементов, а также длины дуг, образующих ортогональные элементы. Численное решение этой системы уравнений осуществляется методом прогонки.

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Решение задачи (1) с условиями (2) осуществляется согласно нижеописанному алгоритму.

1. Исследуемая область разбивается на конечное число ортогональных элементов; задаются геометрические размеры S и R .

2. Время охлаждения $\tau^* = 15$ с при решении задачи (1) с условиями (2) разбивается на конечное число шагов: $\tau^* = \sum \bar{\Delta}\tau_n$, где n – номер временного шага.

3. Задаются физико-механические свойства материалов: жидкой и кристаллизующейся стали, формы.

4. Задаются геометрические размеры выточек $\bar{\Delta}\varphi_0$, φ , γ_0 .

5. Задается шаг по изменению текущего параметра γ : $\bar{\Delta}\gamma$.

6. Задаются начальные и граничные условия по элементам, образующим рассматриваемую область, и областям, образующих выточки.

7. Вычисляются длины дуг элементов, образующих конкретную область.

8. Определяется поле температур на временном шаге $\bar{\Delta}\tau_n$ численным решением уравнения теплопроводности при наличии начальных и граничных условий на данном временном шаге.

9. Если в области I у поверхности S_2 температура $\theta|_{S_2} \leq \theta_k$, то вычисляется толщина закристаллизовавшейся корочки по формуле (6); следует перестройка сетки с операции **7**. Если $\theta|_{S_2} > \theta_k$, то выполняется операция **10**.

10. Решается система уравнений (4) (исключая уравнения теплопроводности) по методике, описанной в работе [17]. Определяются поля напряжений σ_{ij} и перемещений U_i ($i, j = 1, 2, 3$).

11. По области Q на поверхности S_2 находится максимальное (по модулю) напряжение σ_{22} и заносится в матрицу $\{\sigma_2\}'$.

12. Производится шаг по времени. Если $\sum \bar{\Delta}\tau_n < \tau^*$, то выполняется операция **8**. Если $\sum \bar{\Delta}\tau_n = \tau^*$, то выполняется операция **13**.

13. Из матрицы $\{\sigma_2\}'$ находится значение $\sigma_{22} = \max\{\sigma_2\}'$ и заносится в матрицу $\{\sigma_2\}''$.

14. Производится шаг $\gamma_n = \gamma_{n-1} - \bar{\Delta}\gamma$; $\tau = 0$. Если $\gamma_n = 0$, то следует операция **15**, если $\gamma_n > 0$, следует операция **6**.

15. Из матрицы $\{\sigma_2\}''$ выбирается значение $\bar{\sigma}_{22} = \min\{\sigma_3\}'$ и соответствующие ему время τ и угол γ .

16. Окончание решение задачи.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Геометрические параметры формы: $S_0 = 50$ мм, $R = 20$ мм, $\varphi = 150^\circ$.

Временные интервалы: $\bar{\Delta}\tau_n$: 0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 2,0; 5,0; 6,0; 8,0; 9,0 с; $P_1 = 1$ кг/см².

Разбиение области $N_1 \times N_2 = 13 \times 20$.

Как показали расчеты, разбивка области на 13×20 элементов по первой и второй координатной оси у формы без выточек вполне пригодна для анализа проводимых расчетов. Аналогично и у формы с выточками, разбивка на 13×20 элементов по тем же координатным осям тоже вполне оправдана.

Параметры разливаемой стали при $\theta > 1000^\circ\text{C}$ ($\theta_m^* = 1000^\circ\text{C}$):

$$G_2 = 10^4 \text{ МПа}; \alpha_{1,2} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1};$$

$$\lambda = 0,0298 \text{ Вт/(мм} \cdot ^\circ\text{C)};$$

$$L_1 = 270 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг (скрытая теплота плавления)}; \quad (8)$$

$$C_{1,2} = 444 \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}; \gamma_1 = 7,80 \cdot 10^{-6} \text{ кг/мм}^3;$$

$$\theta_k = 1450^\circ\text{C}.$$

Физические свойства металлической формы такие же, как и в (8), но

$$G_3 = 81\,000 \left[1 - 1,2 \left(\frac{Q}{1000} \right)^2 \right] \text{ МПа}. \quad (9)$$

Начальные значения процесса оптимизации $\bar{\Delta}\varphi_0 = 23^\circ$, $\gamma_0 = 104^\circ$; размеры выточек A_1, A_2 (7,1×2,6) мм в направлении осей I и 2 (рис. 3). Размеры выточек соответствуют размерам элементов сетки.

² Одинок В.И., Прокудин А.Н., Сергеева А.М., Севастьянов Г.М. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012661389, Одиссей. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.12.2012.

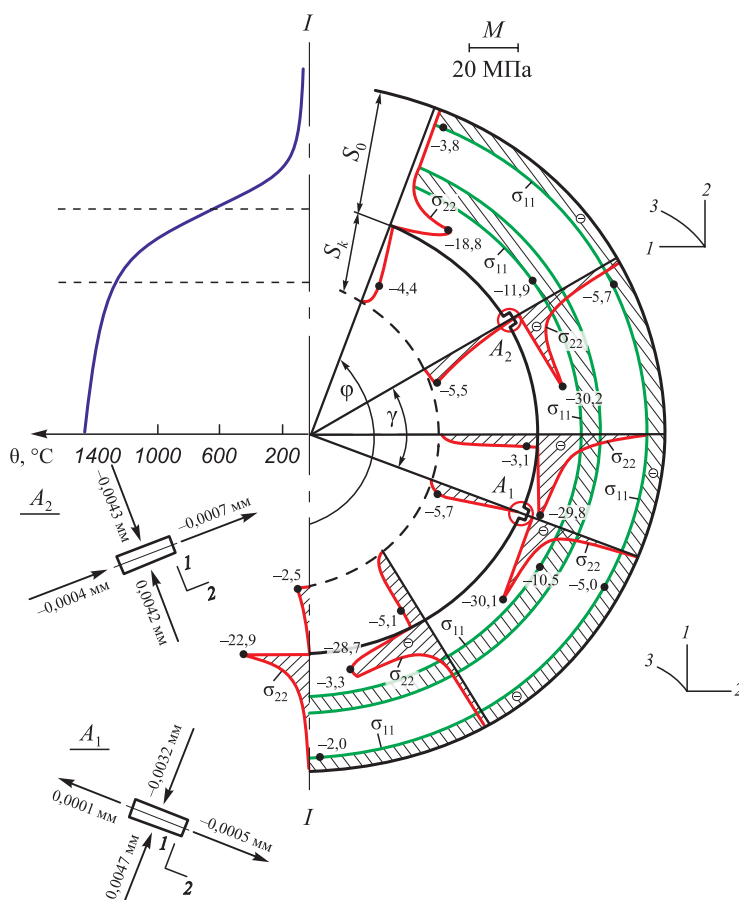


Рис. 3. Эпюры нормальных напряжений σ_{11} , σ_{22} и перемещений U_1 , U_2 по граням выточек A_1 и A_2 в форме при $\tau = 8,6$ с

Fig. 3. Plots of normal stresses σ_{11} , σ_{22} and displacements U_1 , U_2 along the edges of the recesses A_1 and A_2 in the mold at $\tau = 8.6$ s

В результате расчетов по приведенному выше алгоритму получено:

$$F = 29,8 \text{ МПа}; \gamma = 60^\circ; \tau = 8,6 \text{ с.} \quad (10)$$

На рис. 3 приведены эпюры σ_{11} , σ_{22} и перемещения U_1 , U_2 по граням выточек A_1 , A_2 в форме. Видим, что по внутренним углам выточек A_1 , A_2 имеют место концентраторы напряжений σ_{22} , соответственно равные $-30,1$ и $-30,2$ МПа, которые несколько выше (по модулю), чем найденное значение F . Для сравнения на рис. 4 приведены эпюры напряжений σ_{22} , МПа, по сечению формы, не имеющей выточек; время то же – $8,6$ с. Напряжение σ_{33} не приведено, так как оно примерно равно напряжению σ_{22} с разницей $\pm 1\%$.

Видна существенная разница по напряжениям σ_{22} .

На рис. 5 приведены эпюры напряжений σ_{33} для найденных параметров (10).

Хотя напряжения σ_{33} по многим сечениям уменьшились (по модулю), но на большом участке сжимающие напряжения довольно значительны (более 60 МПа). Следовательно, необходимо было оптимизацию вести как по σ_{22} , так и по σ_{33} . Напряжение σ_{22} было взято, так как выточки в форме как бы прорезают их значитель-

ные значения на поверхности S_3 в момент начального процесса охлаждения (рис. 4), не влияя на осевую симметрию. По всей видимости, для глобального снижения

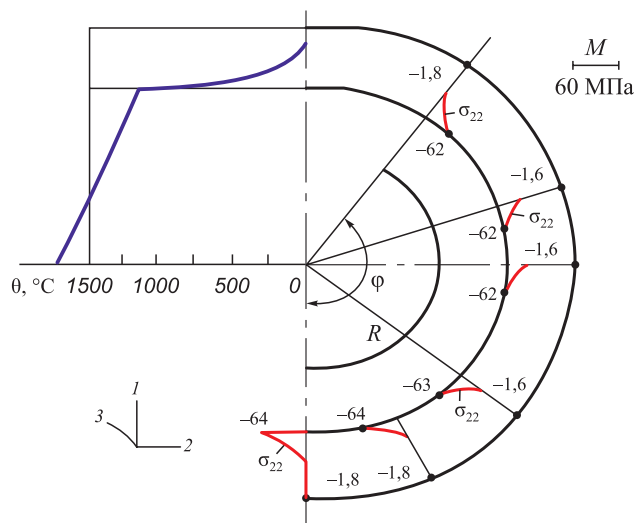


Рис. 4. Эпюры нормальных напряжений σ_{22} по сечению формы без выточек при $\tau = 8,6$ с

Fig. 4. Plots of normal stresses σ_{22} along the mold section without recesses at $\tau = 8.6$ s

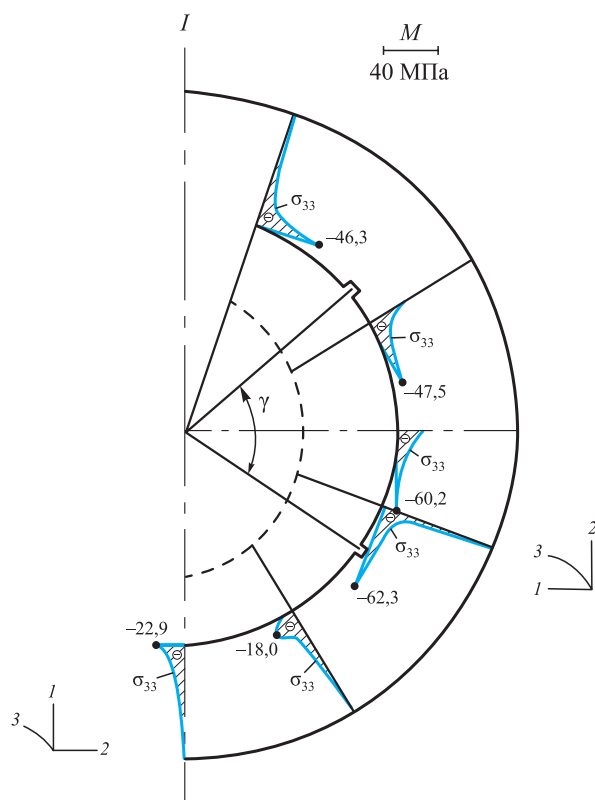


Рис. 5. Эпюры нормальных напряжений σ_{33} в форме при оптимальных расчетных параметрах (10)

Fig. 5. Plots of normal stresses σ_{33} in the mold at optimal design parameters (10)

сжимающих напряжений σ_{22} и σ_{33} необходимо делать в форме дополнительные выточки, перпендикулярные заданным.

Но это уже другая задача (не осесимметричная), с другими уравнениями и другими граничными условиями.

В рамках настоящей работы проведена попытка понизить (по модулю) напряжения σ_{33} , введя дополнительные выточки на поверхности S_2 . По результатам полученного решения (10) следует, что выточки расположены на поверхности S_2 симметрично по углу φ с углом раствора γ (рис. 2). При этом наибольшие (по модулю) напряжения σ_{33} как раз имеют место внутри раствора угла γ (рис. 5). Введем дополнительно еще две выточки на поверхности S_2 внутри найденного угла γ . Проведем расчет НДС оболочечной стальной формы с заданными четырьмя выточками на поверхности S_2 по приведенному выше алгоритму до $\tau = 8,6$ с. Алгоритм значительно упрощается, так как расположение выточек фиксировано и время охлаждения задано. На рис. 6 приведены результаты расчета σ_{22} и σ_{33} по сечению формы на конец временного шага $\tau^* = 8,6$ с. Наблюдаем значительное снижение (по модулю) напряжений σ_{22} , а также снижение (по модулю) напряжений σ_{33} .

Таким образом, новизной настоящей работы является постановка задачи по установлению расположе-

ния температурных швов как технологически важных областей, так и значений напряжений в сферической металлической форме в условиях целевой функции min–max, а также алгоритм решения.

Предложенные методика, алгоритм моделирования и оптимизации стойкости сферических металлических форм к трещинообразованию могут быть использованы при численном решении других задач для различных функциональных оболочек.

Выводы

Поставлена и решена задача оптимизации конструктивных параметров температурных швов в сферичес-

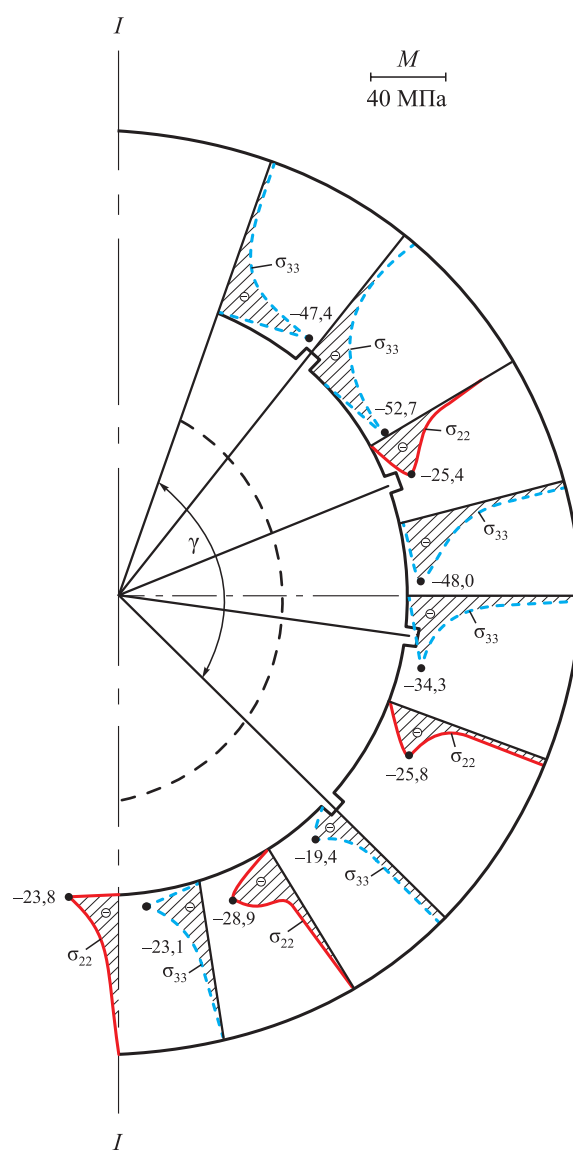


Рис. 6. Эпюры расчетных значений нормальных напряжений σ_{22} и σ_{33} по сечению формы при $\tau^* = 8,6$ с:

— σ_{22} ; — σ_{33}

Fig. 6. Plots of calculated values of normal stresses σ_{22} and σ_{33} along the mold section at $\tau^* = 8.6$ s:

— σ_{22} ; — σ_{33}

кой металлической литейной форме при заливке в нее расплавленного металла. При анализе НДС выявлены конструктивные особенности литейной металлической формы сферической конфигурации.

Наличие температурных швов на поверхности соприкосновения внутренней части формы с жидким металлом значительно снижает влияние возникающих температурных напряжений в первые моменты охлаждения отливки.

Определены рациональные области расположения температурных швов в ОФ и значения напряжений в них в условиях целевой функции min-max и разработанного алгоритма решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Одинокое В.И., Чернышова Д.В., Евстигнеева А.А., Иванкова Е.П. О трещиностойкости керамической оболочковой формы по выплавляемым моделям при затвердевании в ней шарообразной стальной отливки. *Литейное производство*. 2022;(9):17–21.
- Evstigneev A.I., Dmitriev E.A., Odinokov V.I., Chernyshova D.V., Evstigneeva A.A., Ivankova E.P. On the crack resistance of a ceramic shell mold according to the smelted models when a spherical steel casting solidifies in it. *Foundry. Technologies and Equipment*. 2022;(9):17–21. (In Russ.).
2. Литейное производство: Учебник для металлургических специальностей вузов / А.М. Михайлов, Б.В. Бауман, Б.Н. Благов и др. Москва: Машиностроение; 1987:256.
3. Голофаев А.Н. Расчет напряженно-деформированного состояния кокилей методом конечных элементов. *Литейное производство*. 1983;(5):16.
- Golofaev A.N. Calculation of stress-strain state of coils by the finite element method. *Foundry. Technologies and Equipment*. 1983;(5):16. (In Russ.).
4. Дембовский В.В. Численное моделирование процессов формирования отливок в металлических формах. *Литейное производство*. 1992;(6):31–32.
- Dembovskii V.V. Numerical modeling of castings forming in metal molds. *Foundry. Technologies and Equipment*. 1992;(6):31–32. (In Russ.).
5. Огородникова О.М. Напряженно-деформированное состояние металла в эффективном интервале кристаллизации. *Литейное производство*. 2012;(9):21–24.
- Ogorodnikova O.M. Stress-strain state of metal in the effective crystallization interval. *Foundry. Technologies and Equipment*. 2012;(9):21–24. (In Russ.).
6. Десницкая Л.В., Десницкий В.В., Матвеев И.А. Учет напряженно-деформированного состояния кристаллизующихся стальных отливок в технологии их производства. *Литейное производство*. 2019;(4):6–8.
- Desnitskaya L.V., Desnitskii V.V., Matveev I.A. Consideration of the stress-strain state of crystallizing steel castings in their production technology. *Foundry. Technologies and Equipment*. 2019;(4):6–8. (In Russ.).
7. Gamer U. On the elastic-plastic deformation of a sphere subjected to axisymmetric temperature field. *Journal of Thermal Stresses*. 1988;11(3):159–173. <https://doi.org/10.1080/01495738808961930>
8. Khaldi M., Lohman A., Ashrafi H., Arefi M. Analysis of thick-walled spherical shells subjected to external pressure: Elastoplastic and residual stress analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2019;234(1):146442071988295. <https://doi.org/10.1177/1464420719882958>
9. Güven U. On stress distributions in functionally graded isotropic spheres subjected to internal pressure. *Mechanics Research Communications*. 2001;28(3):277–281. [https://doi.org/10.1016/s0093-6413\(01\)00174-4](https://doi.org/10.1016/s0093-6413(01)00174-4)
10. Ootao Y., Ishihara M. Transient thermoelastic analysis for a multilayered hollow cylinder with piecewise power law nonhomogeneity due to asymmetric surface heating. *Acta Mechanica*. 2014;225(10):2903–2922. <https://doi.org/10.1007/s00707-014-1204-3>
11. Saiyan S.G., Paushkin A.G. Development and verification of the two-layer thick-walled spherical shell's finite element model under temperature and force exposure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;913(3):032058. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/913/3/032058>
12. Miller G.K. Stresses in a spherical pressure vessel undergoing creep and dimensional changes. *International Journal of Solids and Structures*. 1995;32(14):2077–2093. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(94\)00197-5](https://doi.org/10.1016/0020-7683(94)00197-5)
13. Karami K., Abedi M., Zamani Nejad M., Lotfian M.H. Elastic analysis of heterogeneous thick-walled spherical pressure vessels with parabolic varying properties. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2012;7(4):433–438. <https://doi.org/10.1007/s11465-012-0336-1>
14. Abdelsalam O.R. Design optimization for a three-layers shrink-fitted pressure vessel exposed to very high pressure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;610:012077. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/610/1/012077>
15. Vitucci G., Mishuris G. Analysis of residual stresses in thermoelastic multilayer cylinders. *Journal of the European Ceramic Society*. 2016;36(9):2411–2417. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2015.12.003>
16. Одинокое В.И., Дмитриев Э.А., Евстигнеев А.И., Намоконов А.Н., Чернышова Д.В., Евстигнеева А.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния и оптимизация угла охвата сферической оболочковой формы опорным наполнителем. *Прикладная механика и техническая физика*. 2025;(1):189–196. <https://doi.org/10.15372/PMTF202415455>
- Odinokov V.I., Dmitriev E.A., Evstigneev A.I., Namokonov A.N., Chernyshova D.V., Evstigneeva A.A. Modeling the stress-strain state and optimizing the angle of contact of a spherical shell mold by a support filler. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2025;(1):189–196. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/PMTF202415455>
17. Математическое моделирование сложных технологических процессов / В.И. Одинокое, Б.Г. Каплунов, А.В. Песков, А.В. Баков. Москва: Наука; 2008:178.
18. Алексеев Г.В., Левин В.А., Терешко Д.А. Моделирование и оптимизация в задачах проектирования сферических

- слоистых тепловых оболочек. *Прикладная механика и техническая физика*. 2019;60(2):158–168.
<https://doi.org/10.15372/PMTF20190213>
- Alekseev G.V., Levin V.A., Tereshko D.A. Simulation and optimization in the problems of design of spherical layered thermal shells. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2019;60(2):323–331.
<https://doi.org/10.15372/PMTF20190213>
19. Чзан Ю., Цзинь Ч., Пан М. Пластическая неустойчивость сферического сосуда высокого давления из ортотропного материала, нагруженного внутренним импульсным давлением. *Прикладная механика и техническая физика*. 2022;63(2):192–196.
<https://doi.org/10.15372/PMTF20220218>
- Zhang Y.C., Jin C.W., Pang M. Plastic instability for a plastic orthotropic spherical pressure vessel under internal impulsive loading. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2022;63(2):343–346. (In Russ.).
<https://doi.org/10.1134/S0021894422020183>
20. Алексеев Г.В., Соболева О.В., Терешко Д.А. Задачи идентификации для стационарной модели массопереноса. *Прикладная механика и техническая физика*. 2008;49(4(290)):24–35.
- Alekseev G.V., Soboleva O.V., Tereshko D.A. Identification problems for a steady-state model of mass transfer. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2008; 49(4):537–547.
<https://doi.org/10.1007/s10808-008-0071-x>
21. Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Чернышова Д.В., Одинокоев В.И., Евстигнеева А.А., Иванкова Е.П. Моделирование внешнего силового воздействия на стойкость оболочковой формы при заливке в нее стали. *Математическое моделирование*. 2022;34(5):61–72.
<https://doi.org/10.20948/mm-2022-05-04>
- Evstigneev A.I., Dmitriev E.A., Chernyshova D.V., Odi-nokov V.I., Evstigneeva A.A., Ivankova E.P. Modeling of external force action on a shell mold for pouring steel. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2022;34(5):61–72. (In Russ.). <https://doi.org/10.20948/mm-2022-05-04>
22. Евстигнеев А.И., Одинокоев В.И., Дмитриев Э.А., Свиридов А.В., Иванкова Е.П. Влияние внешнего теплового воздействия на напряженное состояние оболочковых форм по выплавляемым моделям. *Математическое моделирование*. 2021;33(1):63–76.
<https://doi.org/10.20948/mm-2021-01-05>
- Evstigneev A.I., Odi-nokov V.I., Dmitriev E.A., Sviridov A.V., Ivankova E.P. The influence of external heat exposure on the stress state of shell forms by smelting models. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2021;33(1):63–76. (In Russ.).
<https://doi.org/10.20948/mm-2021-01-05>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Алексей Иванович Евстигнеев, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Управления научно-исследовательской деятельностью, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
ORCID: 0000-0002-9594-4068
E-mail: diss@knastu.ru

Дарья Витальевна Чернышова, аспирант кафедры «Авиационное», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
ORCID: 0000-0001-5142-2455
E-mail: daracernysova744@gmail.com

Валерий Иванович Одинокоев, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Управления научно-исследовательской деятельностью, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
ORCID: 0000-0003-0200-1675
E-mail: 79122718858@yandex.ru

Эдуард Анатольевич Дмитриев, д.т.н., доцент, ректор, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
ORCID: 0000-0001-8023-316X
E-mail: rector@knastu.ru

Анна Алексеевна Евстигнеева, магистрант кафедры «Прикладная математика», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
ORCID: 0000-0003-0667-2468
E-mail: annka.ewstic@mail.ru

Юлия Борисовна Колошенко, старший преподаватель кафедры «Авиационное», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
ORCID: 0009-0005-4480-075X
E-mail: koloschenko2011@yandex.ru

Дмитрий Андреевич Потянихин, к.ф.-м.н., доцент кафедры «Авиационное», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
ORCID: 0000-0001-6113-6073
E-mail: potyanikhin@mail.ru

Aleksei I. Evstigneev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Department of Research Activities, Komsomolsk-on-Amur State University
ORCID: 0000-0002-9594-4068
E-mail: diss@knastu.ru

Dar'ya V. Chernyshova, Postgraduate of the Chair of Aircraft Engineering, Komsomolsk-on-Amur State University
ORCID: 0000-0001-5142-2455
E-mail: daracernysova744@gmail.com

Valerii I. Odi-nokov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Department of Research Activities, Komsomolsk-on-Amur State University
ORCID: 0000-0003-0200-1675
E-mail: 79122718858@yandex.ru

Eduard A. Dmitriev, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Rector, Komsomolsk-on-Amur State University
ORCID: 0000-0001-8023-316X
E-mail: rector@knastu.ru

Anna A. Evstigneeva, MA Student of the Chair "Applied Mathematics", Komsomolsk-on-Amur State University
ORCID: 0000-0003-0667-2468
E-mail: annka.ewstic@mail.ru

Yuliya B. Koloshenko, Senior Lecturer of the Chair of Aircraft Engineering, Komsomolsk-on-Amur State University
ORCID: 0009-0005-4480-075X
E-mail: koloschenko2011@yandex.ru

Dmitrii A. Potyanikhin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assist. Prof. of the Chair of Aircraft Engineering, Komsomolsk-on-Amur State University
ORCID: 0000-0001-6113-6073
E-mail: potyanikhin@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. И. Евстигнеев – формирование концепции статьи, определение цели и задачи исследования, анализ результатов исследования, подготовка текста.

Д. В. Чернышова – проведение и обработка расчетов, подготовка библиографического списка, обработка графического материала.

В. И. Одинокоев – научное руководство, анализ результатов исследований, редактирование и корректировка финальной версии статьи.

Э. А. Дмитриев – проведение расчетов, их анализ, подготовка и корректировка текста.

А. А. Евстигнеева – проведение расчетов, подготовка текстового и графического материала.

Ю. Б. Колошенко – проведение и обработка расчетов, формулирование численной схемы и алгоритма расчетов.

Д. А. Потянихин – проведение расчетов и их обработка.

A. I. Evstigneev – conceptualization, setting goals and objectives of research, analysis of research results, writing the text.

D. V. Chernyshova – carrying out and processing calculations, preparing references, processing graphic material.

V. I. Odinokov – scientific guidance, analysis of research results, editing and correction of the final version of the article.

E. A. Dmitriev – carrying out calculations and their analysis, preparation and correction of the text.

A. A. Evstigneeva – carrying out calculations, preparation of the text and graphic material.

Yu. B. Koloshenko – carrying out and processing calculations, formulation of a numerical scheme and calculation algorithm.

D. A. Potyanikhin – carrying out and processing calculations.

Поступила в редакцию 06.11.2024
После доработки 27.06.2025
Принята к публикации 27.06.2025

Received 06.11.2024
Revised 27.06.2025
Accepted 27.06.2025

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ
ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХINNOVATION IN METALLURGICAL
INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT,
TECHNOLOGIES AND MATERIALS

УДК 621.793:621.783.24

DOI 10.17073/0368-0797-2025-4-383-394



Оригинальная статья

Original article

МЕТАЛЛИЗАЦИЯ РУДНО-УГОЛЬНЫХ БРИКЕТОВ В КОЛЬЦЕВОЙ ПЕЧИ, ОТАПЛИВАЕМОЙ ГЕНЕРАТОРНЫМ ГАЗОМ

Б. П. Куликов, Ю. И. Сторожев[✉], А. С. Потапенко

■ Сибирский федеральный университет (Россия, 660041, Красноярск, Свободный пр., 79)

✉ albin1941@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности процесса получения гранулированного чугуна с применением кольцевой печи с вращающимся подом при реализации технологии ITmk3 (*Ironmaking Technology Mark Three*). Авторы показывают конструкцию угольного газификатора с системой очистки синтезируемого газа и поперечное сечение кольцевой печи. Статья кратко описывает процесс промышленного получения гранулированного высококачественного чугуна. Проведена оценка перспективы использования рассматриваемой технологии на территории Российской Федерации. На первом этапе исследований металлизации железорудного концентрата (ЖРК) углем применен термогравиметрический метод полного факторного эксперимента по определению оптимальных условий металлизации. В экспериментах варьировали соотношение ЖРК: уголь, крупность угля, добавки извести в процентах от суммы (ЖРК + уголь). В результате термогравиметрического анализа авторы получили кривые изменения массы образцов, состава и количества выделившегося газа при изменении температуры нагрева в процессе спекания ЖРК с углем и известью. На втором этапе для отработки технологии ITmk3 разработана лабораторная камерная печь с выдвижным подом, отапливаемая генераторным газом из каменного угля. Рудно-угольные брикеты были изготовлены с соотношением ЖРК, уголь, бентонит 80:20:5 и термообработаны в камерной печи с отоплением генераторным газом из угольного газификатора. В качестве опытного сырья были использованы железорудный концентрат Коршуновского горно-обогатительного комбината и Касьяновский каменный уголь Черемховского месторождения. На основе лабораторных исследований был определен температурно-временной режим обжига рудно-угольных брикетов, обеспечивающий высокую степень металлизации железорудных материалов (80 – 87 %) при обжиге брикетов в диапазоне температур 1080 – 1424 °С в течение 40 мин. Выход брикетов после сушки и обжига составил 66,45 %. Авторы изучили механизмы твердофазного восстановления железорудных материалов в кольцевых печах с вращающимся подом и жидкофазного разделения продуктов восстановления, а также определили состав выделившихся газов при прокаливании рудно-угольных брикетов.

Ключевые слова: металлизация, брикеты, кольцевая печь, гранулированный чугун, генераторный газ, вращающийся под, теплообмен, угольный газификатор

Для цитирования: Куликов Б.П., Сторожев Ю.И., Потапенко А.С. Металлизация рудно-угольных брикетов в кольцевой печи, отапливаемой генераторным газом. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(4):383–394. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-383-394>

METALLIZATION OF ORE-COAL BRIQUETTES IN AN ANNULAR FURNACE HEATED BY GENERATOR GAS

B. P. Kulikov, Yu. I. Storozhev[✉], A. S. Potapenko

■ Siberian Federal University (79 Svobodnyi Ave., Krasnoyarsk 660041, Russian Federation)

✉ albin1941@mail.ru

Abstract. The paper considers the features of producing granular pig iron using an annular furnace with a rotating hearth during implementation of ITmk3 technology (*Ironmaking Technology Mark Three*). The design of a coal gasifier with a synthesized gas purification system and the cross-section of an annular furnace are shown. The article briefly describes the process of industrial production of granular high-quality pig iron. The prospects of using the technology in question on the territory of the Russian Federation were assessed. At the first stage of research on the metallization of iron-ore concentrate (IOC) with coal, the thermogravimetric method of a complete factor experiment was used to determine the optimal metallization conditions. In the experiments, the ratio of IOC was varied: coal, size of coal, lime additives as a percentage of the amount (IOC + coal). As a result of thermogravimetric analysis, the authors obtained the curves of changes in mass of the samples, composition and amount of released gas when the heating temperature changed during sintering of IOC with coal and lime. At the second stage, a laboratory chamber furnace with a portable hearth, heated by generator gas from coal, was developed to test the ITmk3 technology. Ore-coal briquettes were made with a ratio

of IOC, coal, bentonite 80:20:5 and heat-treated in a chamber furnace with heating by generator gas from a coal gasifier. Iron-ore concentrate from the Korshunovsky MPP and Kasyanovsky coal from the Cheremkhovsky deposit were used as experimental raw materials. Based on laboratory studies, the authors determined the temperature-time firing mode of ore-coal briquettes, which ensures a high degree of metallization of iron-ore materials of 80 – 87 % when firing briquettes in the temperature range of 1080 – 1424 °C for 40 min. The yield of briquettes after drying and firing was determined to be 66.45 %. The mechanism of solid-phase reduction of iron-ore materials in annular furnaces with a rotating hearth and liquid-phase separation of reduction products is considered. The composition of the gases released during calcination of ore and coal briquettes was determined.

Keywords: metallization, briquettes, annular furnace, granular pig iron, generator gas, rotating hearth, heat exchange, gasifier

For citation: Kulikov B.P., Storozhev Yu.I., Potapenko A.S. Metallization of ore-coal briquettes in an annular furnace heated by generator gas. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(4):383–394. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-383-394>

ВВЕДЕНИЕ

Производство железа прямого восстановления за последние 10 лет выросло в мире на 18 %, а в России на 66 %, что свидетельствует о быстром развитии этого направления [1]. Широкое распространение процесса прямого восстановления железа отмечено в 1980-х годах, когда в горно-металлургическом комплексе началось широкое применение в качестве восстановителя природного газа. Помимо природного газа в процессе прямого восстановления железа оказалось также возможным использование продуктов газификации углей. В обоих вариантах не требуется применения дорогостоящего кокса [2].

Наиболее предпочтительным, по мнению металлургов-теплотехников, является получение частично металлизированных железорудных материалов со степенью металлизации 30 – 50 %, применяемых в доменном производстве. Высоко металлизированные железорудные продукты со степенью металлизации 85 – 95 % используют для переплавки в сталеплавильных агрегатах с получением высококачественной стали [2]. Способ прямого восстановления железорудных материалов оказался особенно приемлемым для территорий, не имеющих запасов природного газа, но обладающих богатыми месторождениями углей.

В двухтысячных годах в России появилось более десятка изобретений по технологии получения гранулированного чугуна с применением кольцевых печей с вращающимся подом, включающих элементы известных процессов FASTMET, ITmk3. В одном из изобретений [3] представлен способ получения гранулированного чугуна путем дозирования компонентов железорудной шихты с обеспечением соотношений CaO/MgO , $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в пределах 2 – 5 и 4 – 6 соответственно, чтобы температура плавления первичного шлака не превысила 1400 °C. Ряд других патентов [4 – 6] посвящен конструктивным элементам кольцевых печей, позволяющим оптимизировать процессы теплообмена. В частности, в изобретении [6] в зонах загрузки и выгрузки брикетов предусмотрены воздушно-охлаждаемые подвесные экраны с возможностью вертикального перемещения, а зона загрузки дополнительно снабжена устройством для подачи на под защитного материала.

Для условий Сибири наиболее привлекательны разработки, использующие угольные газификаторы [7; 8] и позволяющие кольцевым печам при отсутствии природного газа работать на газифицированном топливе. На основе этих изобретений доработана технологическая линия для производства металлизированного продукта в кольцевой печи с подвижным подом, позволяющая максимально полезно утилизировать тепло отходящих газов [9; 10].

Одним из примеров организации такого производства является строительство в г. Черемхово Иркутской области завода по получению гранулированного чугуна по технологии ITmk3. На выбор данного места повлияли следующие факторы:

- непосредственная близость месторождения одного из основных сырьевых источников – угля (Черемховский угольный бассейн);
- достаточно близкое расположение другого основного источника сырья – железорудного концентрата (Коршуновский ГОК, г. Железногорск, Иркутская обл.);
- развитая транспортная структура района, как в отношении железнодорожного (Транссиб), так и автомобильного транспорта (федеральная трасса).

Инвестором проекта выступила ООО «НПО «Химико-металлургическая компания». Проектная мощность завода составляет 100 тыс. т/год гранулированного передельного чугуна. Уникальный для России способ производства основан на восстановительном обжиге брикетированного сырья (железорудный концентрат (ЖРК) + уголь + доломит) при температуре 1350 – 1450 °C в кольцевой подовой печи, обогреваемой генераторным газом, синтезированным из каменного угля. Производство включает следующие основные объекты:

- участок разгрузки ЖРК с сырьевыми силосами;
- открытый склад угля и участок подготовки угля;
- участок приготовления газообразного топлива газификацией угля;
- линии приготовления смеси (ЖРК + уголь + доломит), ее брикетирования и сушки брикетов;
- установка металлизации рудно-угольных брикетов;
- участок переработки и разделения продуктов металлизации;
- линия оборотного водоснабжения;
- участок газоочистки.

Основные технологические единицы строящегося производства:

– два угольных газификатора SM89 производства КНР с внутренним диаметром 3,6 м, площадью поперечного сечения 10,17 м², высотой 12,5 м с системой очистки генераторного газа (рис. 1);

– кольцевая печь с вращающимся подом (рис. 2). Наружный диаметр печи 20,99 м, внутренний 15,6 м, ширина пода 2,69 м. Во внутренней и наружной стене печи установлены 14 пар газовых горелок MS568, направленных строго навстречу друг другу таким образом, чтобы факелы от противоположных горелок встречались и взаимно рассеивались в центре печи. Скорость

вращения пода переменная: время одного оборота подины может изменяться от 27 до 45 мин.

Ниже приведено краткое описание технологической схемы производства гранулированного передельного чугуна строящегося завода. Доставка сырья на рудный двор осуществляется железнодорожным и автомобильным транспортом. Уголь и доломит доставляются автотранспортом, железорудный концентрат – в полувагонах.

Уголь после дробления рассеивают на инерционном грохоте с ячейкой 12 мм, где выделяются две фракции: надситовая фракция с размерами частиц угля более 12 мм поступает на стадию получения топлив-

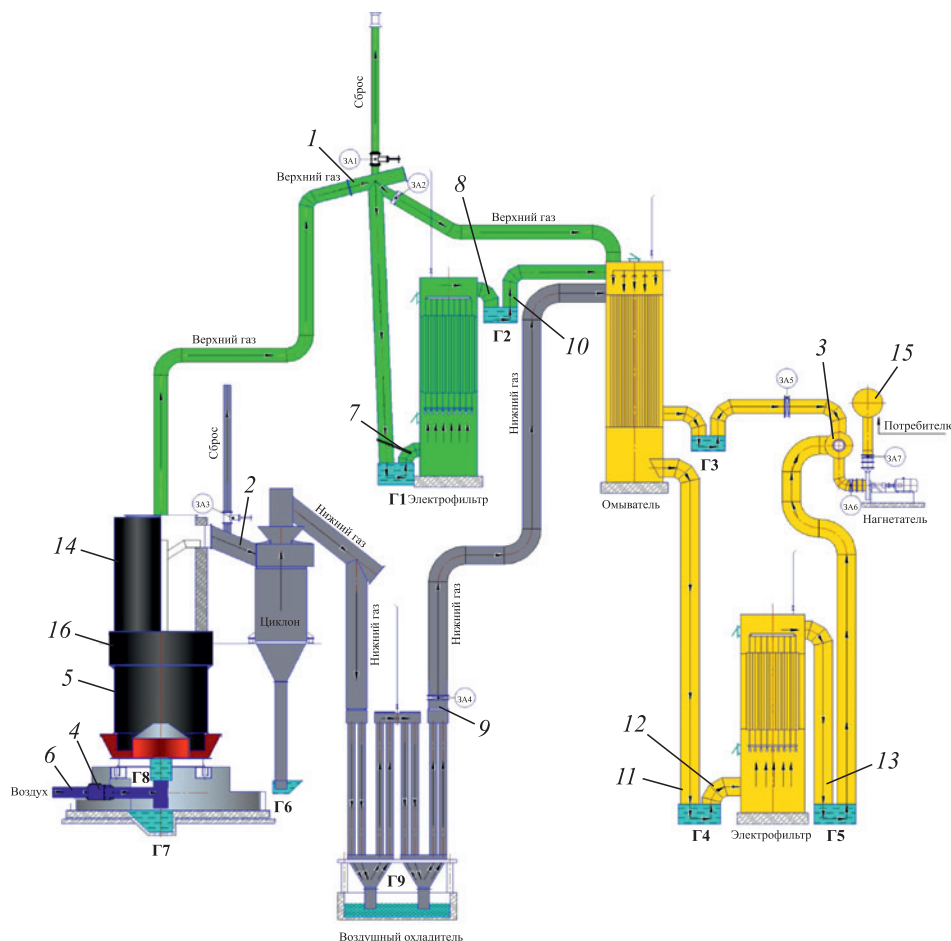


Рис. 1. Газификатор с системой очистки генераторного синтез газа:

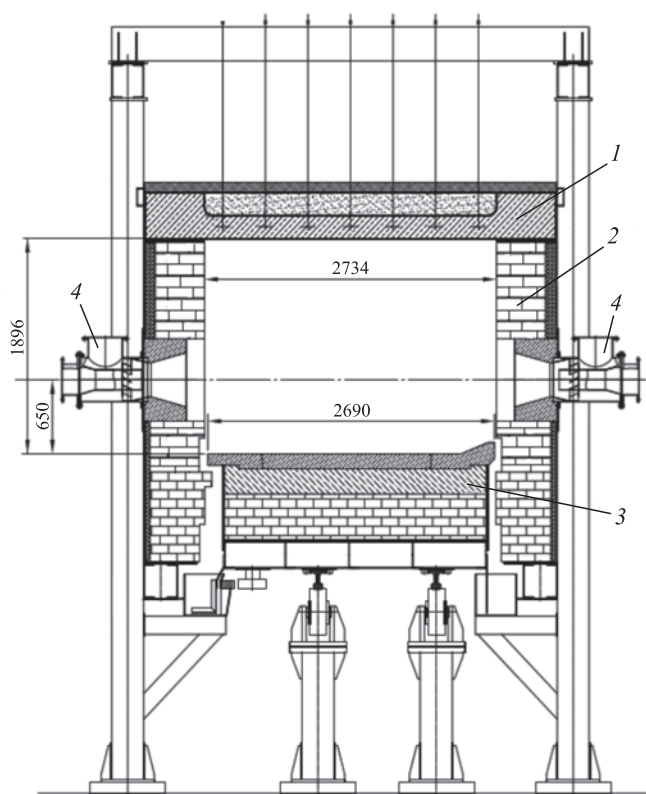
- 1 – газоход верхнего газа; 2 – газоход нижнего газа; 3 – коллектор низкого давления газа; 4 – коробка смешивания (получение агента газификации); 5 – кессон газификатора; 6 – воздуховод; 7 – ввод верхнего газа в электрофильтр 1 из гидрозатвора Г1; 8 – выход очищенного верхнего газа из электрофильтра 1 в гидрозатвор Г2; 9 – газоход нижнего газа из воздушного охладителя в омыватель; 10 – газоход верхнего газа из гидрозатвора Г2 в омыватель; 11 – газоход смешанного верхнего и нижнего газов; 12 – ввод смешанного газа из гидрозатвора Г4 в электрофильтр 2; 13 – газоход смешанного очищенного газа к кольцевой печи металлзации; 14 – задвижки регулировки нижнего газа; 15 – коллектор повышенного давления газа; 16 – шуровочные отверстия газификатора; Г1 – Г9 – гидрозатворы

Fig. 1. Gasifier with generator synthesis gas purification system:

- 1 – upper gas duct; 2 – lower gas duct; 3 – low-pressure gas collector; 4 – mixing box (gasification agent production); 5 – gasifier caisson; 6 – air duct; 7 – upper gas inlet into electrostatic precipitator No. 1 from hydraulic seal Г1; 8 – purified upper gas outlet from electrostatic precipitator No. 1 into hydraulic seal Г2; 9 – lower gas duct from the air cooler to the washer; 10 – upper gas duct from hydraulic seal Г2 to the washer; 11 – mixed upper and lower gas duct; 12 – mixed gas inlet from hydraulic seal Г4 to electrostatic precipitator No. 2; 13 – mixed purified gas duct to the annular metallization furnace; 14 – valves adjustment of lower gas; 15 – collector of increased gas pressure; 16 – sizing holes of gasifier; Г1 – Г9 – hydraulic seals



a



б

Рис. 2. Кольцевая печь для производства гранулированного чугуна:

a – внешний вид строящейся печи;

б – поперечный разрез; 1 – подвесной свод; 2 – футеровка стен;

3 – вращающийся под; 4 – горелочные устройства

Fig. 2. Annular furnace for production of granular pig iron:

a – appearance of the furnace under construction;

б – cross section; 1 – suspended arch; 2 – wall lining;

3 – rotating hearth; 4 – tuyers

ного синтез газа в газификатор. Подситовую фракцию с размерами частиц менее 12 мм направляют в мельницу для измельчения, требуемого по технологии производства рудно-угольных брикетов. Брикеты состава 80 % ЖРК + 20 % уголь + 5 % доломит изготавливают на валковом прессе. Максимальная производительность пресса составляет $14 \pm 0,5$ т/ч по рудно-угольным брикетам. Для удаления избыточной влаги и предвари-

тельного нагрева рудно-угольные брикеты поступают в сушилку, куда в качестве сушильного агента направляют воздух, нагретый в рекуператоре до $350 - 400$ °C отходящими из кольцевой печи газами.

Металлизацию железорудного сырья в составе рудно-угольных брикетов проводят в кольцевой печи с вращающимся подом. Печь разделена на четыре технологических сектора:

- сектор загрузки «угольной постели», выполняющей роль защиты огнеупорного материала пода и основания для укладки брикетов на под;
- сектор укладки брикетов на под;
- сектор восстановительного обжига брикетов;
- сектор разгрузки металлizedованного продукта с пода печи.

В первую очередь на под печи пластинчатым питателем загружают «постель», которую равномерно распределяют по поду печи слоем 3 – 5 см. Вслед за «постелью» на под укладывают подсушенные и нагретые на конвейерной решетке до ~ 250 °C рудно-угольные брикеты, которые также равномерно распределяют по поду печи поверх «постели» в 1 – 2 слоя.

По мере вращения пода «пирог» брикетов с «постелью» поступает в сектор восстановительного обжига брикетов. Синтезированный в газификаторе топливный газ с температурой $200 - 250$ °C по системе теплоизолированных газоходов распределяют по горелкам печи в автоматическом режиме, обеспечивая требуемый температурный режим в зоне металлизации. Для более эффективного сжигания топливного газа и экономии энергетических ресурсов подаваемый в горелки воздух предварительно нагревают до $400 - 450$ °C в рекуператорах.

Из зоны восстановительного обжига печи металлizedованный продукт поступает в зону охлаждения и разгрузки, где водоохлаждаемыми шнеками снимается с пода и по водоохлаждаемой течке направляется в скребковый холодильник. Охлажденный металлizedованный продукт из холодильника подают в сито-бурат, где сначала отделяется «постель», а затем проходит механическое воздействие на агломерированный продукт металлизации. В результате агломерат распадается на шлак и гранулированный чугун. Далее механическая смесь шлака и чугуна по конвейеру поступает в магнитный сепаратор, где выделяется магнитная составляющая – целевой продукт технологического процесса – железо прямого восстановления в виде гранул передельного чугуна.

Реализация представленного выше инновационного проекта началась с приобретения и монтажа основного и вспомогательного оборудования, строительства инфраструктурных объектов. Параллельно с монтажом кольцевой печи, угольных газификаторов и другого оборудования проведены исследования по металлизации рудно-угольных брикетов в лабораторных условиях. Цель исследований – оптимизация состава брикетов

и отработка технологии получения гранулированного чугуна по технологии ITmk3. Результаты этих исследований представлены в настоящей статье.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Одним из преимуществ металлизации рудно-угольных материалов в кольцевой печи по технологии ITmk3 является получение гранул чугуна в оболочке из шлака. Это обстоятельство облегчает отделение гранул чугуна от основной массы шлака [11 – 14], снижает затраты на последующую переработку чугуна. Важным требованием технологии ITmk3 является использование железорудных концентратов с содержанием $Fe_{\text{общ}}$ более 60 % и обеспечение содержания углерода в сплаве в диапазоне 2,5 – 4,5 % после полного восстановления железа. Если концентрация остаточного углерода в сплаве менее 1,5 %, температура плавления железа существенно не снизится, и температура в печи в этом случае должна быть максимальной, около 1450 – 1550 °C. Технологией определены гарантируемые показатели готовой продукции (чугун гранулированный), мас. %: >96 Fe; 2,0 – 4,0 C; 0,2 Si; 0,05 P; 0,04 – 0,08 S [15 – 20]. Однако рассматриваемая в этих публикациях технология рассчитана на высококалорийные виды топлива, в частности, на природный газ.

Первый этап работы по определению оптимальных условий металлизации ЖРК углем выполнен с использованием термогравиметрии методом полного факторного эксперимента на приборе синхронного термического анализа STA 449 Jupiter. Образцы для исследований готовили в соответствии с матрицей планирования полного трехфакторного эксперимента (табл. 1), где в качестве факторов управления выбраны:

– X_1 – соотношение ЖРК: уголь (–1 → (70:30) % = 2,333; +1 → (80:20) % = 4).

– X_2 – крупность угля, мкм (–1 → –50; +1 → –315).

– X_3 – добавки извести, % от суммы (ЖРК + уголь) –1 → 0; +1 → 5.

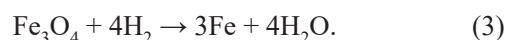
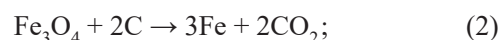
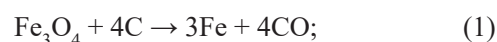
Параметром оптимизации служило извлечение железа в сплав.

В экспериментах использовали агломерационный железорудный концентрат Коршуновского ГОК с содержанием, % сух.: 62,6 Fe_2O_3 ; 24,0 FeO; 3,95 SiO_2 ;

2,654 Al_2O_3 ; 1,9 CaO; 4,0 MgO; 0,13 MnO; 0,255 TiO_2 ; 0,04 SO_2 ; 0,37 P_2O_5 ; 5,8 H_2O ; 1,65 п.п.п. В качестве восстановителя применен Касьяновский каменный уголь Черемховского месторождения с содержанием, %: 77,3 C^r; 1,2 S^r; 16,5 A^c; 11,5 H_2O^p ; 13,7 O^r; 5,6 H^r; 1,1 N^r; 45,6 V^r. Низшая теплота сгорания угля составляет 23 028,5 кДж/кг. Температура плавления золы равна 1310 – 1390 °C. Химический состав золы, мас. %: 67,1 SiO_2 ; 19,2 Al_2O_3 ; 2,5 Fe_2O_3 ; 2,2 CaO; 1,6 MgO; 0,7 K_2O ; 0,1 TiO_2 ; 0,1 Na_2O ; 4,4 SO_3 ; 0,01 MnO_2 .

Готовые смеси прессовали на лабораторном прессе с усилием 80 – 100 кг/см² с получением таблеток диаметром 8 мм и высотой ~5 мм. Образцы нагревали от 40 до 1400 °C со скоростью 30 °C/мин в токе аргона. Масса навесок составляла 513 – 593 мг. Исследование проводили в корундовом тигле в виде плоской тарелочки. В ходе экспериментов контролировали качественный и количественный состав газовых продуктов термолитиза с помощью квадрупольного масс-спектрометра Aelos. Энергия электронного удара 70 эВ. По анализу выделившихся газов рассчитывали степень металлизации железа.

По матрице планирования полного трехфакторного эксперимента проведено восемь опытов. Дериватограммы спекания ЖРК, угля и извести с анализом выделяющихся газов получены на 24 рисунках, по три рисунка на каждый образец. Учитывая идентичный характер дериватограмм, на рис. 3 в качестве примера показаны результаты анализа газовой выделений из образца в опыте б: $X_1 = +1$; $X_2 = -1$; $X_3 = +1$, содержащего 80 % ЖРК + 20 % уголь + 5 % известь (сверх 100 %). Количество CO, CO_2 , H_2O определяли из дериватограмм по площади эффектов выделения этих газов сравнением с эффектами, полученными для реперных образцов. Расчет степени металлизации ЖРК производили по реакциям



Температурный интервал от начала записи до ~550 – 600 °C (первый скачок интенсивной потери веса)

Таблица 1. Уровни факторов управления и интервалы варьирования

Table 1. Levels of control factors and variation intervals

Фактор	Уровень факторов			Интервал варьирования
	– 1	0	+ 1	
X_1 – отношение ЖРК: уголь	2,333	3,167	4,000	0,833
X_2 – крупность угля, мкм	–50,0	–132,5	–315,0	82,5
X_3 – добавки извести, % от суммы (ЖРК + уголь)	0	2,5	5,0	2,5

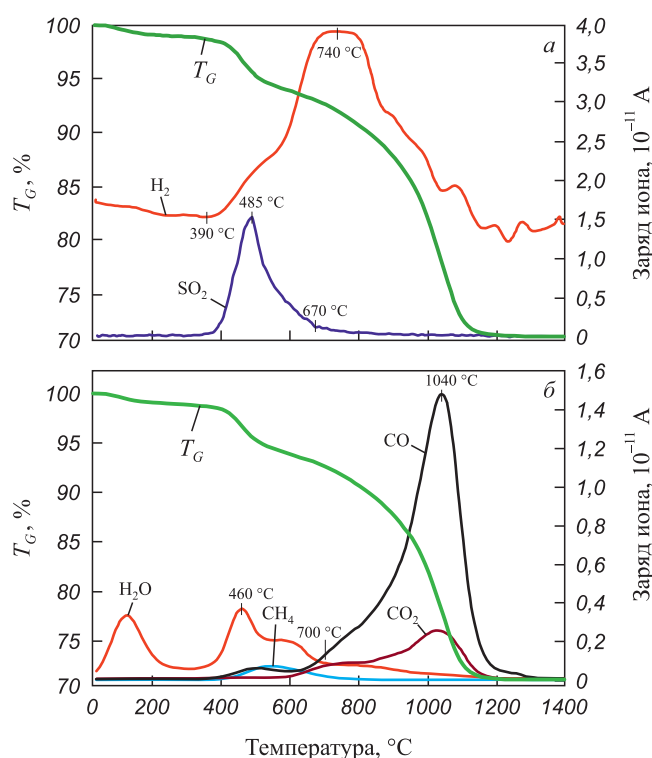


Рис. 3. Дериватограмма восстановления ЖРК углем с составом газовых продуктов термолитиза и взаимодействия (на примере образца б); T_G – кривая потери массы образцом

Fig. 3. Derivatogram of IOC reduction by coal with composition of gas products of thermolysis and interaction (using the example of sample б); T_G – curve of mass loss by the sample

в расчетах не учитывали, поскольку этот процесс связан с разложением угля без взаимодействия с ЖРК. Данный факт подтверждается дериватограммой разложения индивидуального Черемховского угля (в статье не представлена). При нагреве образцов выделяются газы CO , CO_2 , H_2O и метан. Соотношение выделившихся газов CO и CO_2 характеризует степень метаморфизма угля. В расчете учитывали количество воды, образовавшейся по реакции (3) в интервале 800 – 1000 °C.

Термогравиметрический анализ при обжиге восьми смесей (ЖРК + уголь + известь) показал, что газовыделения из образцов можно разбить на три температурных интервала, °C: 40 – 210; 210 – 685; 685 – 1400. Для первой зоны (40 – 210 °C) характерно выделение гигроскопической влаги с потерей массы от 0,61 до 1,29 %.

Во второй температурной зоне (210 – 685 °C) идентифицировано выделение летучих соединений. В этом температурном интервале выделяется вся сера в виде SO_2 , основное количество CH_4 , H_2 , H_2O . Потеря массы составила от 5,46 до 8,6 %.

В третьей температурной зоне (685 – 1400 °C) происходят взаимодействия с образованием преимущественно CO и CO_2 . Потеря массы варьируется от 21,22 до 29,7 %. Масса твердых остатков после обжига таблеток составила 60,64 – 72,48 %.

В табл. 2 приведен компонентный и количественный состав газовой фазы, вычисленный по результатам термогравиметрии и принятый к расчету степени металлизации по матрице планирования.

Результаты расчета степени металлизации железа по реакциям (1) – (3) представлены в табл. 3.

На основании полученных данных рассчитаны коэффициенты и составлено линейное уравнение зависимости извлечения железа из ЖРК (Y_1) от соотношения ЖРК:уголь (X_1), крупности угля (X_2), добавки извести (X_3) в кодированных координатах.

$$Y_1 = 66,83 - 8,82X_1 - 4,16X_2 + 3,78X_3 + 1,77X_1X_2 + 0,84X_1X_3 + 0,0037X_2X_3 + 1,29X_1X_2X_3. \quad (4)$$

Проверка значимости коэффициентов полученного уравнения показала, что с надежностью 95 % значимыми являются коэффициенты при X_1 , X_2 , X_3 и X_1X_2 . В итоге уравнение (4) запишется в сокращенном виде

$$Y_1 = 66,83 - 8,82X_1 - 4,16X_2 + 3,78X_3 + 1,77X_1X_2. \quad (5)$$

В физических величинах уравнение (5) имеет вид

$$Y_1 = 6,83 - 8,82 \frac{X_1 - 3,167}{0,833} - 4,16 \frac{X_2 - 132,5}{82,5} + 3,73 \frac{X_3 - 2,5}{2,5} + 1,77 \frac{X_1 - 3,167}{0,833} \frac{X_2 - 132,5}{82,5}, \quad (6)$$

где слагаемые числителя – нулевые значения уровней факторов, знаменатели – интервалы варьирования соответствующих факторов табл. 1.

Таблица 2. Состав газовой фазы, выделившейся при спекании ЖРК с углем и известью

Table 2. Composition of the gas phase released during sintering of IOC with coal and lime

Компонент, мг	Номер образца (опыта)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
CO	105,78	59,72	66,12	66,61	74,30	67,89	64,45	55,40
CO_2	2,60	26,86	28,89	35,89	35,78	31,70	35,69	26,00
$\text{H}_2\text{O}_{(800-1000\text{ }^\circ\text{C})}$	0,61	1,75	2,38	1,28	1,91	0,39	1,44	1,40

Таблица 3. Результаты расчета степени металлизации образцов по реакциям (1) – (3) восстановления магнетита

Table 3. Results of calculating the degree of samples metallization by reactions (1) – (3) of magnetite reduction

Наименование позиций	Номер образца (опыта)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Fe (1), мг	201,95	89,58	99,18	99,92	111,46	101,84	96,67	83,10
Fe (2), мг	4,97	51,28	55,15	68,52	68,31	60,52	68,14	49,64
Fe (3), мг	1,42	4,08	5,55	2,99	4,46	0,91	3,36	3,27
Общее Fe в образце, мг	242,79	253,97	234,90	278,50	238,17	256,17	235,65	273,62
Извлечение Fe, %	85,81	57,07	68,06	61,55	77,35	63,73	71,36	49,70
Примечание: Fe (1) – количество восстановленного железа, с образованием CO; Fe (2) – количество восстановленного железа, с образованием CO ₂ ; Fe (3) – количество восстановленного железа, с образованием H ₂ O. Среднее содержание железа в ЖРК Коршуновского ГОКА 62,6 %.								

На основании проведенных термогравиметрических исследований образцов сделаны следующие выводы.

- Наиболее значимый фактор, влияющий на степень металлизации ЖРК, это соотношение ЖРК:уголь, следующим по значимости является крупность угля.

- Увеличение крупности угля (с –50 мкм до –315 мкм) повышает температуру окончания процесса восстановления железа с 1255 до 1367 °С.

- Добавление извести интенсифицирует восстановление железа и переводит его в низкотемпературную область (1367 → 1300 °С).

- Полученные результаты дают основание полагать, что реакция металлизации проходит в два этапа. Как минимум два скачка изменения скорости потери веса (DTG) и соответствующее им выделение CO. Данный факт можно интерпретировать как непосредственно восстановление (основной этап). Второй этап – агрегация капель чугуна, выдавливание газа из капилляров и межкапельного пространства. Первый этап начинается с 640 °С по нарастающей скорости потери веса до 990 °С. Далее скорость потери веса стабилизируется и начинает падать до 1180 – 1250 °С. Затем начинается второй этап восстановления, который заканчивается при 1250 – 1360 °С.

- Относительно низкую степень металлизации железа (50 – 85 %), полученную на данном этапе исследований, можно объяснить тем, что:

- анализ и расчет производили только по газу;
- процесс металлизации происходил в печи в атмосфере аргона;

- используемый в исследованиях Черемховский уголь был с высокой степенью метаморфизма;

- возможно, в интервале от начала записи дериватограммы до ~550 – 600 °С (первый скачек интенсивной потери веса) наряду с разложением угля проходила частичная металлизация железа, которую не учитывали в расчетах;

- Для эффективного восстановления оксидов железа в состав брикетов целесообразно вводить уголь с мини-

мальным количеством летучих и максимальным количеством углерода.

С целью определения режимов работы строящегося завода по производству передельного чугуна выполнен следующий этап исследований, который заключался в изготовлении и обжиге брикетов ЖРК с углем и известью в лабораторных условиях. Для исследований изготовлена лабораторная печь с выдвижным подом (рис. 4), отапливаемая газифицированным топливом из каменного угля. Размер внутреннего пространства печи: сечение 500×500 мм, длина 650 мм. Печь оснащена водоохлаждаемым газоходом с принудительным отводом газообразных продуктов. Для измерения температуры в печи установлена платина-платинородиевая термопара. Перед загрузкой брикетов печь разогревали 1,5 ч до температуры ~1100 °С.

Для изготовления брикетов использован агломерационный железорудный концентрат Коршуновского ГОКа и Касьяновский каменный уголь Черемховского месторождения. Для отопления печи использован паровоздушный генераторный газ следующего состава, мас. %: 5,0 CO₂; 0,2 O₂; 27,0 CO; 13,0 H₂; 2,7 CH₄; 0,3 C₂H₄; 51,8 N₂. Теплота горения генераторного газа 5976 кДж/м³.

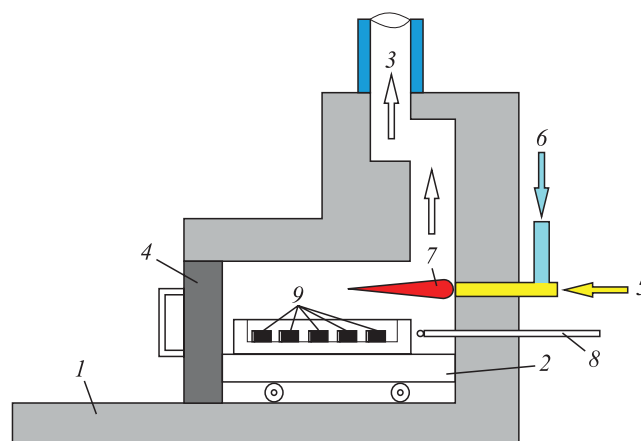
Сформированные на прессе брикеты высотой и диаметром ~22 мм загружали в керамические поддоны с коксовой «постелью» и обжигали на выдвижном поду печи (рис. 5). Состав, вес брикетов до и после обжига, условия обжига приведены в табл. 4.

Брикеты нагревали до 1424 °С (рис. 6). Снижение температуры в печи до 1078 °С на начальном этапе термообработки связано с индукционным периодом нагрева холодных брикетов после внесения их в печь. На втором участке происходил интенсивный нагрев брикетов до температуры 1249 °С со скоростью 21,4 °С/мин в течение 8 мин. Средняя температура газов в печи на этом участке составила 1163 °С.

На третьем участке температурной кривой в интервале 1249 – 1277 °С скорость роста температуры сни-



а



б

Рис. 4. Лабораторная печь с выдвижным подом на генераторном газе:

а – общий вид; б – схема; 1 – печь; 2 – выдвижной под; 3 – водоохлаждаемый газоход; 4 – дверь; 5 – подвод генераторного газа; 6 – воздух; 7 – факел; 8 – платина-платинородиевая термопара; 9 – рудно-угольные брикеты

Fig. 4. Laboratory furnace with portable hearth on generator gas:

а – general view; б – scheme; 1 – furnace; 2 – portable hearth; 3 – water-cooled duct; 4 – door; 5 – generator gas supply; 6 – air; 7 – torch; 8 – platinum-platinum-rhodium thermocouple; 9 – ore-coal briquettes

зилась до ~ 2 °С/мин. Практически это была горизонтальная площадка, обусловленная эндотермическим эффектом восстановления оксидов железа. Средняя температура газов в печи на этом участке составила 1263 °С.

Дальнейший нагрев до 1424 °С связан с обеспечением температурных условий для жидкостного разделения металлической и шлаковой фаз [21]. Средняя скорость нагрева в течение 16 мин составила 9,2 °С/мин. Средняя температура газов в печи на этом температурном участке – 1350 °С. После сушки и обжига брикетов

тов в течение 40 мин выход готового продукта составил в среднем $69,3 \pm 2,01$ % (табл. 4).

На рис. 7 показаны образцы брикетов после завершения металлизации. Внутренняя часть брикетов представлена гранулами чугуна. Снаружи они покрыты золошлаковой оболочкой, которая частично защищает чугун от окисления.

Металлизация брикетов осуществляется по механизму, описанному в работах [22; 23]. В железорудном концентрате Коршуновского ГОК содержатся оксиды Fe_2O_3 и FeO . Процесс восстановления железа из оксидов происходит ступенчато по схеме: $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$.



Рис. 5. Рудно-угольные брикеты в процессе металлизации в керамических поддонах

Fig. 5. Ore-coal briquettes during metallization in ceramic pallets

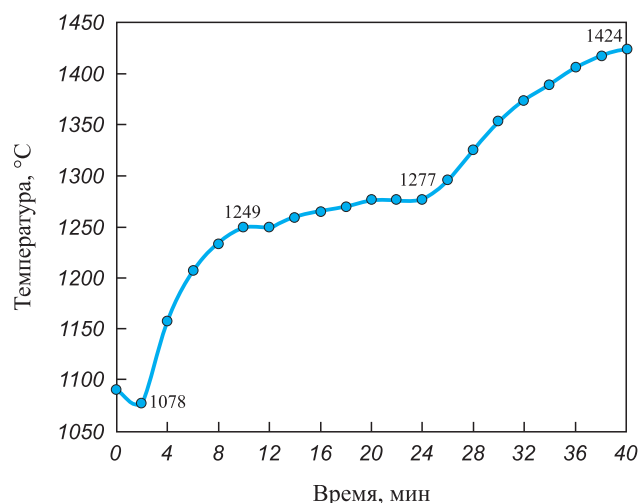


Рис. 6. Температурно-временной график металлизации рудно-угольных брикетов

Fig. 6. Temperature-time graph of metallization of ore-coal briquettes

**Таблица 4. Характеристика брикетов
ЖРК + уголь + известь до и после обжига**

**Table 4. Characteristics of
IOC briquettes + coal + lime before and after firing**

Показатель, размерность	Партия 1	Партия 2	Партия 3
Состав брикетов	80 % ЖРК + 20 % уголь + + 5 % известь (сверх 100 %)		
Давление прессования, атм.	100		
Вес брикета, г:			
1	21,8	22,8	22,2
2	22,8	25,4	20,8
3	23,6	24,0	22,0
4	23,8	23,6	21,0
5	24,0	21,4	21,0
6	21,4	21,4	22,4
7	22,6	22,8	21,8
8	23,2	22,8	21,0
9	21,0	–	22,0
10	25,4	–	21,2
Средний вес брикета, г	22,960	23,025	21,540
Средний вес после сушки, г	21,77	21,95	21,00
Содержание влаги, %	5,17	4,67	2,51
Общий вес после обжига, г	150,6	117,7	151,0
Средний вес после обжига, г	15,06	14,71	15,10
Температура обжига, °C	1090 – 1425		
Время обжига, мин	40		

В качестве восстановителя выступает преимущественно оксид углерода, который синтезируется в результате взаимодействия углерода угля с двуокисью углерода:



Часть железа науглероживается с образованием карбида железа:



При содержании углерода в восстановленном металле 2 – 4 % температура плавления сплава снижается с 1539 до 1170 – 1380 °C. В результате снижения температуры плавления науглероженное железо переходит в жидкое состояние. Вследствие когезионных сил мелкие частицы расплавленного железа объединяются в более крупные капли. При этом шлаковые компоненты шихты находятся в твердом состоянии. По мере повышения температуры шихты до температуры плавления золы угля 1310 – 1390 °C происходит плавление шлаковых составляющих. В расплавленном состоянии шлак и металл не смешиваются вследствие разности

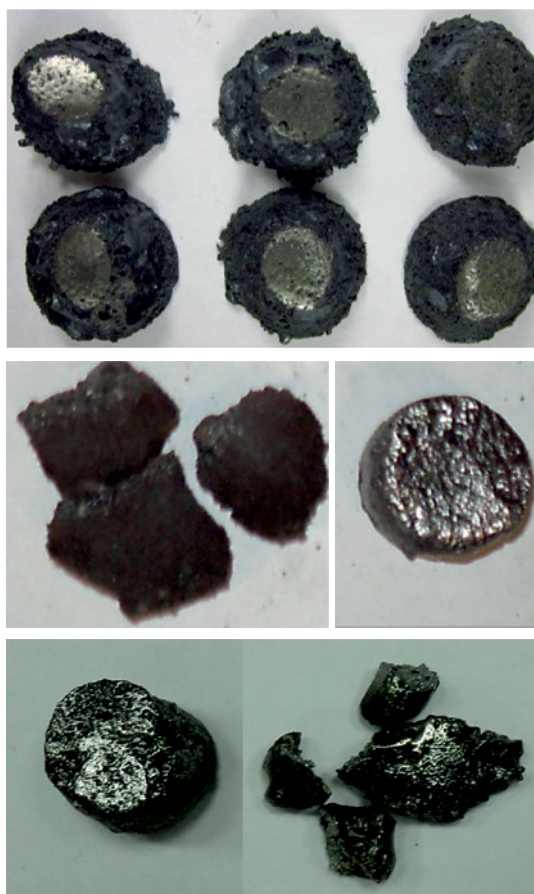


Рис. 7. Рудно-угольные брикеты после металллизации с разделением металла и шлака

Fig. 7. Ore-coal briquettes after metallization with separation of metal and slag

плотностей и образуют самостоятельные фазы. При охлаждении расплав кристаллизуется с образованием чугуна и шлака.

В итоге процесс металллизации и получения гранулированного чугуна происходит следующим образом: окомкованная шихта в виде брикетов → восстановление железа из оксидов при температурах 300 – 1200 °C → расплавление железа при температурах 1200 – 1300 °C с выходом расплавленного Fe_3C на поверхность пористых брикетов → плавление шлака при температурах 1310 – 1390 °C с формированием металлической и шлаковой фаз → разделение металлической и шлаковой фаз при температуре 1400 °C → охлаждение и разделение чугуна и шлака.

В табл. 5 приведен усредненный состав продуктов металллизации трех партий брикетов состава: 80 % ЖРК + 20 % уголь + 5 % известь (сверх 100 %), характеристика которых дана в табл. 4.

Следует отметить, что генераторный газ, очищенный от смолистых веществ, обладает низкой степенью черноты, порядка 0,2 – 0,3 ед. При малых значениях степени черноты факела теплообмен при нагреве рудно-угольных брикетов недостаточно интенсивный.

Таблица 5. Состав продуктов, полученных в результате металлизации ЖРК Коршунковского ГОК

Table 5. Composition of the products obtained as a result of metallization of IOC from Korshunovsky MPP

Номер партии	Содержание железосодержащего сплава в корольке, %	Степень металлизации, %	Содержание примесей, мас. %		
			углерод	фосфор	сера
1	77,9 ± 1,22	81,6 ± 1,46	1,73 ± 0,14	0,090 ± 0,02	0,117 ± 0,025
2	76,1 ± 1,65	79,9 ± 1,60	1,78 ± 0,18	0,135 ± 0,02	0,182 ± 0,033
3	86,0 ± 2,11	87,8 ± 1,89	2,59 ± 0,26	0,099 ± 0,02	0,144 ± 0,030

Тепловой поток, падающий от факела горелки на слой нагреваемого материала, можно существенно увеличить (на 20 – 25 %) за счет повышения степени черноты газового потока путем его карбюризации [24]. Карбюризацию факела можно осуществить вдуванием в него в зоне восстановления небольшого количества мелко-измельченного сухого малозольного угля или некондиционного прокаленного нефтяного кокса. При этом примерно в 1,5 – 2,0 раза возрастет степень черноты газового потока, соответственно возрастет светимость факела, увеличится количество тепла, передаваемого от факела нагреваемым брикетам, уменьшится длительность их нагрева до заданной температуры.

Выводы

Термогравиметрические исследования и лабораторные эксперименты по металлизации рудно-угольных брикетов в камерной печи показали возможность получения гранулированного чугуна в промышленном масштабе в кольцевой печи с вращающимся подом при использовании в качестве топлива генераторного газа, полученного при газификации каменного угля.

Необходимые температуры металлизации (1450 – 1550 °С) обеспечиваются сжиганием генераторного газа, подогревом воздуха, газа и брикетов отходящими из печи дымовыми газами [9]. При необходимости интенсификации теплообмена в печи возможно осуществление карбюризации топливного факела измельченным сухим углем или прокаленным нефтяным коксом.

На основании проведенных термогравиметрических исследований сделаны следующие выводы.

- На степень металлизации ЖРК наиболее сильно влияет соотношение ЖРК: уголь.
- Крупность угля повышает температуру окончания процесса восстановления железа с 1255 до 1367 °С.
- Добавление извести интенсифицирует восстановление железа и переводит его в низкотемпературную область (1367 → 1300 °С).
- Для эффективного восстановления оксидов железа в состав брикетов необходимо вводить уголь с минимальным количеством летучих и с максимальным содержанием углерода.

На основе лабораторных исследований определен температурно-временной режим обжига рудно-уголь-

ных брикетов, обеспечивающий высокую степень металлизации железорудных материалов (80 – 87 %) при обжиге брикетов в диапазоне температур 1080 – 1424 °С в течение 40 мин. Выход металлизированных брикетов составил 66,45 %.

Годовой выпуск гранулированного чугуна в соответствии с проектным материальным балансом для рассматриваемой печи составит 100 000 т.

Бескоксовый способ получения гранулированного чугуна в небольших масштабах наиболее востребован, когда металлургическое и угольное производства находятся на одном территориальном экономическом пространстве, что позволяет избегать сложных логистических проблем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аникин А.Е., Галевский Г.В., Руднева В.В. Исследование технологических режимов эффективной металлизации оксиджелезосодержащих отходов металлургического производства. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020;63(5):335–343.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-335-343>
Anikin A.E., Galevskii G.V., Rudneva V.V. Technological modes of efficient metallization of iron-oxide-containing waste from metallurgical production. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020;63(5):335–343. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-335-343>
2. Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М., Ходоровская И.Ю. Эффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии: Учебное пособие. Екатеринбург: ООО «УИПЦ»; 2012:670.
3. Пат. 2490332 RU. Способ металлизации железорудного сырья с получением гранулированного чугуна / Рашников В.Ф., Дубровский Б.А., Галкин В.В. и др.; заявл. 12.05.2011; опубл. 20.08.2013. Бюллетень № 23.
4. Пат. 92522 RU. Печь для получения восстановленного металла / Григорьев В.Г., Паткин П.Г., Тепикин С.В.; заявл. 12.01.2009; опубл. 20.03.2010. Бюллетень № 8.
5. Пат. 94680 RU. Печь для получения восстановленного металла / Григорьев В.Г., Паткин П.Г., Тепикин С.В.; заявл. 02.02.2010; опубл. 27.05.2010. Бюллетень № 15.
6. Пат. 134532 RU. Кольцевая печь с вращающимся подом / Гринберг И.С., Гринберг А.И.; заявл. 27.06.2013; опубл. 20.11.2013. Бюллетень № 32.
7. Пат. 87166 RU. Технологическая линия для производства металлизированного продукта / Черных В.Е.,

- Григорьев В.Г., Тепикин С.В. и др.; заявл. 21.05.2009; опубл. 27.09.2009. Бюллетень № 27.
8. Пат. 93802 RU. Технологическая линия для производства металлизированного продукта / Григорьев В.Г., Паткин П.Г., Тепикин С.В. и др.; заявл. 11.01.2010; опубл. 05.10.2010. Бюллетень № 13.
 9. Сторожев Ю.И., Подборский Л.Н., Худяков И.А. Металлизация формованных рудно-угольных материалов в кольцевой печи. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2015;58(4):235–240.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-4-235-240>
Storozhev Yu.I., Podborskii L.N., Khudyakov I.A. Metallization of molded ore-coal materials in circular furnace. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015;58(4):235–240. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-4-235-240>
 10. Сторожев Ю.И., Подборский Л.Н., Худяков И.А. Охлаждение продуктов металлизации в кольцевой печи. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2015;1382(2):33–36.
Storozhev Yu.I., Podborskii L.N., Khudyakov I.A. Cooling of metallization products in annular furnace. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2015;1382(2):33–36. (In Russ.).
 11. Горбачев В.А., Евстюгин С.Н., Копоть Н.Н., Рыбкин В.С., Шаврин С.В. Принципы выбора технологии прямого получения железа. *Сталь*. 2006;12(6):42–46.
Gorbachev V.A., Evstyugin S.N., Kopot' N.N., Rybkin V.S., Shavrin S.V. Selecting technology for direct iron production. *Stal'*. 2006;12(6):42–46. (In Russ.).
 12. Юнес Р., Опришко И.А., Лобода П.И. Анализ технологий прямого восстановления оксидов металлов с применением печей с вращающимся подом. *Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»*. 2011;61:184–192.
Yunes R., Opryshko I.A., Loboda P.I. Analysis of technologies of direct metal oxides reduction in circular furnaces. *Vestnik NTUU "KPI"*. 2011;61:184–192. (In Russ.).
 13. Дубровский Б.А., Шиялев П.В., Редин Е.В. и др. Металлизация шпатовых железняков Бакальского месторождения с получением гранулированного чугуна. В кн.: *Сборник трудов VI Международной конференции «Энергосберегающие технологии в промышленности, печные агрегаты, экология»*. Москва: НИТУ «МИСиС»; 2012: 178–182.
 14. Kikuchi S., Ito S., Kobayashi I., Tsuge O., Tokuda K. ITmk3 process. *KOBELCO Technology Review*. 2010;29:77–84.
 15. Tanaka N., Miyagawa K., Harada T. FASTMET, FAST-MELT, and ITmk3. Development of new coal-based iron-making processes. *Direct from Midrex, RHF Technologies*. 2007/2008:8–13.
 16. Kobayashi I., Tanigaki Y., Liagami A. A new process to produce iron directly from fine ore and coal. *Iron and Steel-maker*. 2001;28(9):19–22.
 17. Sohn I., Fruehan R.J. The reduction of iron oxides by volatiles in a rotary hearth furnace process: Part I. The role and kinetics of volatile reduction. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2005;36:605–612.
<https://doi.org/10.1007/s11663-005-0051-y>
 18. Gordon Y., Els J. ITmk3 technology and its application for mining and steel industry in Ukraine and Russia. In: *Int. Conf. on Ironmaking Technology (Kyiv, 21 March 2007)*. Kyiv; 2007:128–131.
 19. Ishikawa H., Kopfle J., McClelland J., Ripke J. Rotary hearth furnace technologies for iron ore and recycling applications. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2008;53(2):541–545.
 20. Rutherford S.D., Kopfle J.T. Mesabi Nugget: World's first commercial ITmk3 Plant. *Iron and steel Technology*. 2010;7:38–43.
 21. Асанов А.В., Рощин А.В., Рощин В.Е. Жидкофазное разделение продуктов твердофазного восстановления железо-ванадиевых концентратов. *Вестник ЮУрГУ. Металлургия*. 2010;(13(189)):37–40.
Asanov A.V., Roshchin A.V., Roshchin V.E. Liquid-phase separation of products of solid-phase reduction of ferrovanadium concentrates. *Vestnik YuUrGU. Metallurgiya*. 2010;(13(189)):37–40. (In Russ.).
 22. Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н. и др. Металлургия чугуна. Учебник для вузов. Москва: Академ-книга; 2004:774.
 23. Патрушов А.Е. Разработка пирометаллургической технологии извлечения железа и цинка из пылей электросталеплавленного производства: Автореферат диссертации ... кандидата технических наук. Иркутск; 2021:19.
 24. Гуцин С.Н., Казяев М.Д., Крюченков Ю.В. и др. Теория и практика теплогенерации. Учебник. Изд. 2-е. Екатеринбург: УГТУ-УПИ; 2005:379.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Борис Петрович Куликов, д.х.н., ведущий научный сотрудник кафедры «Общая металлургия», Сибирский федеральный университет
ORCID: 0009-0004-5881-8515
E-mail: Kulikov-Boris@Yandex.ru

Юрий Иванович Сторожев, к.т.н., доцент, Сибирский федеральный университет
ORCID: 0009-0004-6083-8777
E-mail: albin1941@mail.ru

Александр Сергеевич Потапенко, к.т.н., доцент кафедры техносферной и экологической безопасности, Сибирский федеральный университет
ORCID: 0009-0004-5881-8515
E-mail: komvzvodt-81@mail.ru

Boris P. Kulikov, Dr. Sci. (Chem.), Leading Researcher of the Chair "General Metallurgy", Siberian Federal University
ORCID: 0009-0004-5881-8515
E-mail: Kulikov-Boris@Yandex.ru

Yurii I. Storozhev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Siberian Federal University
ORCID: 0009-0004-6083-8777
E-mail: albin1941@mail.ru

Aleksandr S. Potapenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Technosphere and Environmental Safety, Siberian Federal University
ORCID: 0009-0004-5881-8515
E-mail: komvzvodt-81@mail.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Б. П. Куликов – разработка плана исследований, организация лабораторных и производственных испытаний, анализ литературных источников.

Ю. И. Сторожев – участие в лабораторных испытаниях, обобщение результатов лабораторных и производственных испытаний, подготовка основного текста статьи.

А. С. Потапенко – обзор информации по металлизации рудно-угольных материалов, компьютерная обработка материалов статьи.

B. P. Kulikov – development of a research plan, organization of laboratory and production tests, analysis of literary sources.

Yu. I. Storozhev – participation in laboratory tests, generalization of the results of laboratory and production tests, text preparation.

A. S. Potapenko – review of information on metallization of ore-coal materials, computer processing of the article materials.

Поступила в редакцию 27.03.2025

После доработки 17.04.2025

Принята к публикации 10.06.2025

Received 27.03.2025

Revised 17.04.2025

Accepted 10.06.2025

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ
ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХINNOVATION IN METALLURGICAL
INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT,
TECHNOLOGIES AND MATERIALS

УДК 669.013

DOI 10.17073/0368-0797-2025-4-395-401



Оригинальная статья

Original article

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ И ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ИЗВЕСТИ ИЗ МЕЛА

А. С. Сивков[✉], С. И. Чибизова, А. Д. Апасова

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

[✉ sivkovsasha777@yandex.ru](mailto:sivkovsasha777@yandex.ru)

Аннотация. Статья посвящена актуальной теме повышения эффективности вращающихся печей, используемых при производстве металлургической извести из мела. Рассмотрены методы усовершенствования конструкций и тепловой работы этих агрегатов, что особенно важно в условиях современного производства. Работа начинается с описания значимости извести в металлургической отрасли и особенностей применения вращающихся печей как основных агрегатов для ее производства. Отмечена необходимость повышения производительности и снижения энергозатрат. В статье представлен обзор перспективных технических решений, таких как конструктивные изменения, оптимизация теплообменных устройств, совершенствование горелочных механизмов, внедрение систем автоматического контроля и управления технологическим процессом. Также рассмотрены результаты испытаний, подтверждающих целесообразность использования мела определенных марок. Авторы обращают внимание на важность таких факторов, как качество сырья и квалификация обслуживающего персонала, которые влияют на эффективность обжига. Предложены новые технические решения, позволяющие повышать эффективность процесса обжига и снижать энергозатраты. Изучены основные проблемы, связанные с производством извести из мела. Предлагаемые усовершенствования направлены на решение указанных в работе проблем и улучшение качества конечного продукта. Особое внимание уделено оптимизации теплового режима печи, что позволит более эффективно использовать тепловую энергию и снизить расход топлива, что в свою очередь приведет к снижению себестоимости производства извести. Реализация предложенных технических решений позволит значительно повысить экономическую и экологическую эффективность ее производства. Авторы подчеркивают, что продолжение исследований в данной области перспективно для улучшения эксплуатационных характеристик вращающихся печей и, соответственно, качества получаемого продукта.

Ключевые слова: известь, известняк, мел, подогреватель, вращающаяся печь, обжиг, сталь, ОЭМК, ЛГОК

Для цитирования: Сивков А.С., Чибизова С.И., Апасова А.Д. Направления совершенствования конструкции и тепловой работы вращающейся печи для реализации технологии производства металлургической извести из мела. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(4):395–401. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-395-401>

IMPROVING THE DESIGN AND THERMAL OPERATION OF A ROTARY KILN FOR PRODUCTION OF METALLURGICAL LIME FROM CHALK

A. S. Sivkov[✉], S. I. Chibizova, A. D. Apasova

National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

[✉ sivkovsasha777@yandex.ru](mailto:sivkovsasha777@yandex.ru)

Abstract. The article is devoted to the topical issue of increasing the efficiency of rotary kilns used in the production of metallurgical lime from chalk. Methods of improving the structures and thermal operation of these units are considered, which is especially important in modern production conditions. The work begins with a description of the importance of lime in the metallurgical industry and the specifics of using rotary kilns as the main units for its production. There is a need to increase productivity and reduce energy consumption. The article provides an overview of promising technical

solutions, such as: design changes, optimization of heat exchange devices, improvement of burner mechanisms, introduction of automatic control and process control systems. The results of tests confirming the expediency of using chalk of certain brands are also considered. Attention is drawn to the importance of factors such as the quality of raw materials and the qualifications of service personnel that affect the firing efficiency. The authors proposed new technical solutions to increase the efficiency of roasting process and reduce energy consumption. The article discusses the main problems associated with the production of lime from chalk. The proposed improvements are aimed at solving the mentioned problems and improving the quality of the final product. Special attention is paid to optimizing the thermal mode of the furnace; this will make it possible to use thermal energy more efficiently and reduce fuel consumption, which in turn will lead to reduction in the cost of lime production. Implementation of the proposed technical solutions will significantly increase the economic and environmental efficiency of lime production. The article emphasizes that continued research in this area is promising for improving the performance of rotary furnaces and, consequently, the quality of the resulting product.

Keywords: lime, limestone, chalk, heater, rotary kiln, roasting, steel, Oskol Electrometallurgical Combine (OEMK), Lebedinsky Mining and Processing Combine (LGOK)

For citation: Sivkov A.S., Chibizova S.I., Apasova A.D. Improving the design and thermal operation of a rotary kiln for production of metallurgical lime from chalk. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(4):395–401. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-395-401>

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире известь является одним из важных материалов, используемых в металлургической отрасли, а вращающаяся печь – одним из наиболее эффективных и распространенных технологических агрегатов для ее получения. Необходимость повышения эффективности работы вращающихся печей, применяемых в технологии производства металлургической извести из мела, является актуальной задачей. Совершенствование конструкции и тепловой работы данных печей позволит увеличить производительность, снизить энергозатраты и улучшить качество получаемого продукта [1; 2].

Приведен обзор наиболее актуальных и перспективных технических решений, реализация которых позволит повысить эффективность работы вращающихся печей для производства металлургической извести из мела, снизить энергопотребление и улучшить экологические показатели технологического процесса [3].

КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ

Вращающаяся печь является одним из наиболее распространенных типов термических агрегатов, применяемых в металлургии, производстве цемента, извести, керамики, огнеупоров и др. [4; 5]. Конструктивные особенности и принцип работы вращающихся печей обуславливают их широкое применение для осуществления таких высокотемпературных процессов, как сушка, обжиг, восстановление, спекание и т. д. Основными преимуществами вращающихся печей перед другими типами термических агрегатов являются:

– непрерывность технологического процесса (материал, загружаемый в верхнюю часть печи, постепенно перемещается вдоль наклонного вращающегося барабана к выгрузочному устройству в нижней части, обеспечивая тем самым непрерывность процесса и возможность регулирования времени пребывания материала в рабочем пространстве);

– интенсивный тепло- и массообмен (вращение барабана печи и лопатки-насадки, установленные на внутренней поверхности, обеспечивают интенсивное перемешивание материала, что способствует эффективному тепло- и массообмену между твердой и газовой фазами);

– возможность использования различных видов топлива (вращающиеся печи могут работать как на твердом, так и на газообразном или жидком топливе, что повышает гибкость производственного процесса);

– относительная простота конструкции и эксплуатации (в сравнении с другими типами термических агрегатов, шахтными и камерными печами вращающиеся печи имеют более простую конструкцию, что облегчает их обслуживание и ремонт);

– высокая производительность (благодаря непрерывности процесса и интенсивному тепло- и массообмену вращающиеся печи способны обеспечивать производительность, достигающую сотен и тысяч тонн в сутки).

Конкретные конструктивные решения и компоновка элементов вращающихся печей определяются спецификой технологического процесса, физико-химическими свойствами перерабатываемого сырья, требованиями к качеству готовой продукции, энергетическими и экологическими факторами. Устройство вращающейся печи приведено на рис. 1 [6; 7].

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИЗВЕСТИ

Проведенные испытания по производству металлургической извести из мела на лабораторной модели НИТУ «МИСИС» подтвердили возможность и целесообразность применения мела АО «Лебединский горно-обогатительный комбинат» на АО «Оскольский электрометаллургический комбинат» (обе компании входят в холдинг Металлоинвест) [8].

Вращающаяся печь представляет собой теплообменный аппарат в виде расположенной наклонно вращающейся трубы со встречным движением раскален-

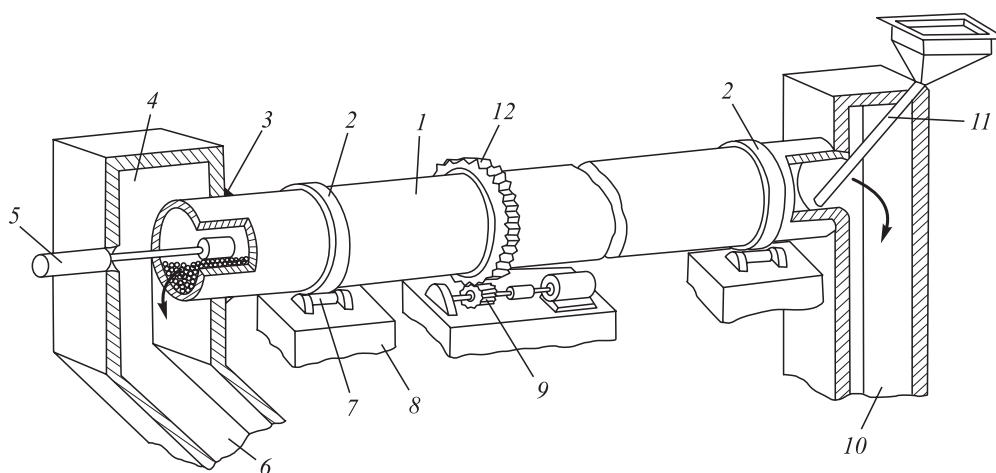


Рис. 1. Устройство вращающейся печи:

1 – барабан; 2 – бандаж; 3 – уплотнение; 4 – топочная камера (горячая головка); 5 – горелка; 6 – разгрузочная течка; 7 – опорные ролики; 8 – фундамент; 9 – привод барабана; 10 – газоотводная камера; 11 – загрузочное устройство; 12 – венцовая шестерня

Fig. 1. Rotary kiln design:

1 – drum; 2 – bandages; 3 – seal; 4 – kiln chamber (hot head); 5 – burner; 6 – discharge flow; 7 – support rollers; 8 – foundation; 9 – drum drive; 10 – exhaust chamber; 11 – loading device; 12 – ring gear

ных газов и известняка. Размеры кусков загружаемого в печь материала 20 – 60 мм. Номинальная производительность печи составляет 360 т/сут.

Основным элементом вращающейся печи является стальной цилиндрический барабан, диаметром 3,6 м и длиной 75 м. Диаметр этого барабана по всей длине печи одинаков.

Анализ эксплуатационных характеристик существующих конструкций вращающихся печей, используемых в производстве извести, позволяет выделить ряд ключевых направлений их совершенствования, направленных на повышение энергоэффективности, экологичности и экономичности данного технологического процесса. Вопросам повышения эффективности технологических процессов производства извести в обжиговых агрегатах, и в частности во вращающихся печах, посвящен ряд фундаментальных работ.

В монографии А.В. Монастырева «Производство извести» [9] подробно рассмотрены конструктивные особенности и технологические режимы работы различных типов обжиговых печей, в том числе вращающихся. Автором выделены основные факторы, влияющие на эффективность использования топлива при производстве извести: качество и подготовка сырья, конструктивные решения печей, работа вспомогательного оборудования, квалификация обслуживающего персонала. Представлены технические решения по совершенствованию конструкции вращающихся печей, такие как применение внутripечных теплообменных устройств, оптимизация систем загрузки и выгрузки сырья, модернизация горелочных механизмов.

В монографии А.В. Монастырева и Р.Ф. Галиахметова «Печи для производства извести» [10] более детально рассмотрены особенности конструкции и тех-

нологических режимов работы вращающихся печей, влияющие на эффективность использования топлива. Авторами проанализировано влияние таких факторов, как длина и наклон барабана печи, наличие внутripечных теплообменников, режимы загрузки и выгрузки сырьевых материалов.

В патенте РФ 2079785 «Газовая горелка» [11] Л.В. Калашникова и Г.Л. Калашникова предложена конструкция регулируемой газовой горелки, позволяющей управлять параметрами факела и интенсивностью теплообмена в рабочем пространстве печи. Данная разработка способствует повышению эффективности сжигания топлива в обжиговых агрегатах (рис. 2).

В монографии Н.П. Табунщикова «Производство извести» рассмотрены вопросы правильной эксплуатации обжиговых печей, поддержания оптимальных технологических режимов, контроля состава отходящих газов. Отмечается, что данные факторы оказывают существенное влияние на эффективность использования топлива в процессе производства извести.

Одной из основных проблем, ограничивающих эффективность работы вращающихся печей, является неравномерное распределение и движение сырьевого материала внутри барабана печи [12]. Для решения данной проблемы исследуемой печи перспективным направлением является разработка усовершенствованных загрузочных и разгрузочных устройств, обеспечивающих оптимальное распределение и перемещение сырья по длине печи. Ключевым направлением повышения энергетической эффективности вращающихся печей для производства извести является совершенствование систем тепломассообмена. Рассматриваемая печь отличается значительными потерями теплоты с отходящими газами, а также недостаточным исполь-

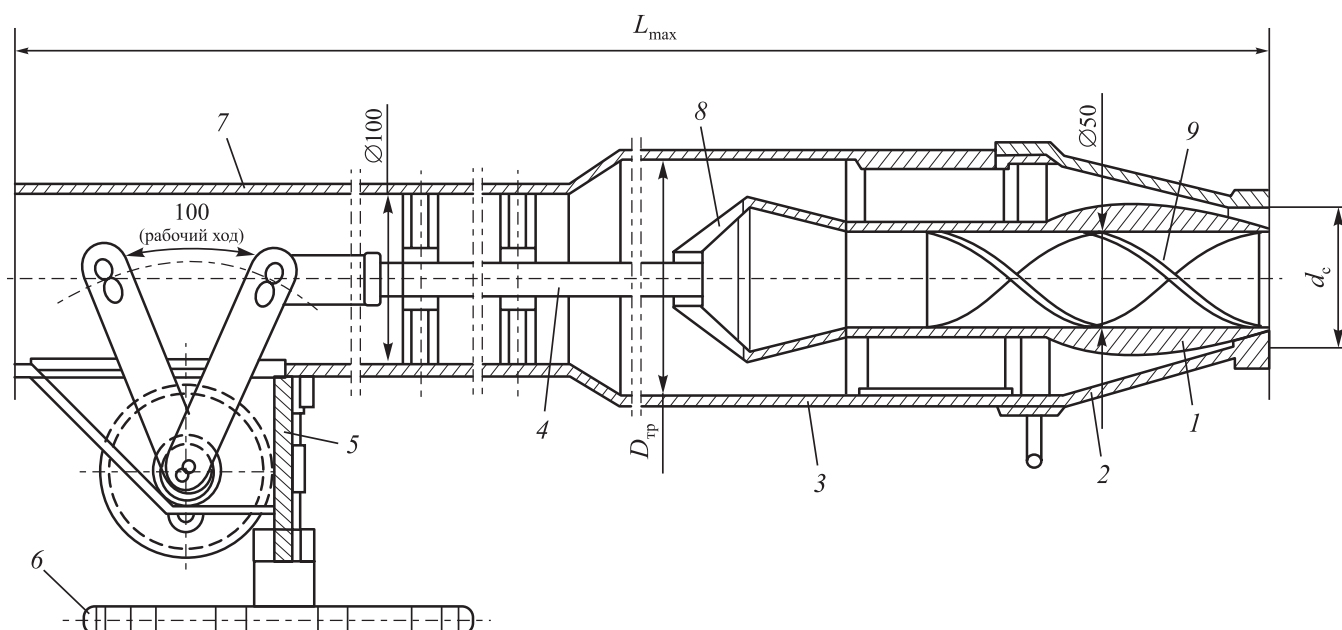


Рис. 2. Горелка одноканальная регулируемая типа ГРЦ (горелки регулируемые цементные) [11]:
1 – корпус первой ступени горелки; 2 – вихревой стабилизатор; 3 – камера смешения первой ступени;
4 – камера смешения второй ступени; 5 – корпус второй ступени; 6 – фланец крепления горелки;
7 – регулирующий орган подачи топлива второй ступени; 8 – форсунка подачи топлива (или распылитель);
9 – форсунка или сопло подачи воздуха второй ступени

Fig. 2. Single-channel adjustable cement burner [11]:
1 – housing of the burner first stage; 2 – vortex stabilizer; 3 – mixing chamber of the first stage;
4 – mixing chamber of the second stage; 5 – housing of the second stage; 6 – burner mounting flange;
7 – fuel supply regulator of the second stage; 8 – fuel supply nozzle (or sprayer);
9 – nozzle or air supply blowpipe of the second stage

зованием теплового потенциала продуктов обжига для предварительного подогрева сырья [13].

Повышение эффективности теплообменных процессов может быть достигнуто за счет:

- установки высокоэффективных регенеративных или рекуперативных теплообменных устройств (вращающихся воздухоподогревателей, трубчатых теплообменников);

- организации многоступенчатых схем теплообмена с рециркуляцией и каскадным использованием тепловой энергии.

Внедрение указанных технических решений позволит снизить расход топлива, уменьшить тепловые потери, а также повысить температуру воздуха, поступающего в зону горения, что в итоге приведет к повышению тепловой эффективности вращающейся печи.

Исследование процессов горения и теплоотдачи факела в рабочем пространстве печей для производства извести является важной задачей, так как определяет размеры технологической зоны обжига, интенсивность теплового воздействия на материал и состояние футеровки.

А.А. Ансимов и др. [14] разработали математическую модель и алгоритм расчета теплотехнических характеристик процесса обжига известняка во вращающейся печи. Авторами установлена эмпирическая

зависимость для определения длины факела газовой горелки, учитывающая такие параметры, как диаметр горелки, внутренний диаметр печи, расходы топлива и воздуха. Предложен подход к расчету средней эффективной температуры газового потока в зоне контакта с поверхностью обжигаемого известняка.

На основе разработанной модели проведено численное исследование влияния различных факторов на теплоотдачу факела и температурное состояние обжигаемого материала. Показано, что существенное влияние на теплоотдачу факела оказывают коэффициент избытка воздуха, температура нагрева воздуха, степень черноты футеровки печи и низшая теплота сгорания топлива [14]. При этом толщина футеровки оказывает менее значительное влияние. Для оптимизации режима обжига известняка предложен алгоритм расчета результирующего теплового потока факела в зону обжига. Данный алгоритм позволяет путем корректировки расхода топлива, коэффициента избытка воздуха и температуры его нагрева обеспечить требуемую температуру обжига известняка, исключая перегрев футеровки печи.

Э.Э. Меркер и др. [15] в своих работах также рассматривали вопросы повышения эффективности сжигания топлива во вращающихся печах для производства извести. Авторами отмечается, что важными факторами, определяющими теплообмен в рабочем пространстве

печи, являются длина и температура топливного факела. Характеристики факела, в свою очередь, зависят от конструкции и режимов работы горелочных устройств.

Проведенные исследования показывают, что оптимизация условий горения топлива и теплообмена в зоне обжига во вращающихся печах для производства извести является актуальной задачей. Разработанные математические модели и алгоритмы расчета позволяют определять рациональные параметры работы печей, обеспечивающие требуемые показатели качества извести при минимальных энергетических затратах.

Существующие конструкции характеризуются высокими выбросами оксидов азота и серы, а также значительными потерями теплоты с дымовыми газами [16].

Для решения данных проблем могут быть применены следующие технические решения:

- использование ступенчатого или двухстадийного сжигания топлива, позволяющего снизить образование NO_x ;

- организация рециркуляции дымовых газов для уменьшения избытка воздуха и температуры в зоне горения;

- применение низкоэмиссионных горелочных устройств, оборудованных системами автоматического регулирования подачи воздуха и топлива;

- внедрение систем каталитической или селективной некаталитической очистки отходящих газов от оксидов азота и серы.

Комплексное применение указанных мероприятий позволит снизить энергозатраты на процесс обжига, а также существенно уменьшить выбросы вредных веществ в атмосферу. Важным фактором, влияющим на эксплуатационные характеристики вращающихся печей, является надежность и долговечность их основных конструктивных элементов, таких как корпус (барабан) и футеровка [17].

Реализация технических решений будет способствовать увеличению срока службы печей, снижению затрат на техническое обслуживание и ремонт, повышению общей надежности и экономической эффективности производства извести [18]. Для повышения эффективности работы вращающихся печей актуальным направлением является внедрение систем автоматического контроля и управления технологическим процессом. Это позволит обеспечить оптимальные режимы работы печи, стабильные условия обжига и, как следствие, высокое качество получаемой извести. Помимо совершенствования традиционных конструкций вращающихся печей, направленное на улучшение их эксплуатационных характеристик, перспективным направлением является разработка и внедрение нетрадиционных технических решений [19; 20]. Основными направлениями совершенствования конструкций вращающихся печей для производства извести являются:

- совершенствование систем загрузки и выгрузки сырьевых материалов;

- повышение эффективности теплообменных процессов;

- совершенствование системы сжигания топлива;

- совершенствование конструкции корпуса и футеровки;

- автоматизация управления технологическим процессом;

- использование нетрадиционных конструктивных решений.

Реализация данных направлений позволит повысить энергоэффективность, экологичность и экономическую эффективность производства извести во вращающихся печах, а также обеспечить высокое и стабильное качество готовой продукции.

Выводы

Анализ эксплуатационных характеристик существующей конструкции вращающейся печи диаметром 3,6 м и длиной 75 м для производства 360 т/сут извести выявил ряд недостатков и проблем, негативно влияющих на технико-экономические и экологические показатели данного технологического процесса. К основным проблемным аспектам относятся: ограниченные возможности повышения производительности, низкая энергетическая эффективность, трудности обеспечения стабильного качества обжига известняка, повышенный износ основных элементов конструкции, значительные выбросы диоксида углерода и других загрязняющих веществ.

Показаны основные направления совершенствования конструкции вращающейся печи для получения извести, реализация которых позволит повысить энергетическую и экономическую эффективность производства извести во вращающихся печах, обеспечит высокое и стабильное качество готовой продукции с соблюдением экологических требований.

Обзор современного состояния производства извести и существующих конструкций вращающихся печей показал актуальность задачи совершенствования конструкции и тепловой работы вращающихся печей для реализации технологии производства извести из мела. Решение данной задачи имеет важное практическое значение для повышения эффективности и экологической безопасности данного производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Сивков А.С., Шумаков В.В. Производство извести для металлургического производства / *Научное сообщество студентов XXI столетия. Естественные науки: Сборник статей по материалам XLV Международной студенческой научно-практической конференции*. 2016;9(44). URL: [https://sibac.info/archive/nature/9\(44\).pdf](https://sibac.info/archive/nature/9(44).pdf) (дата обращения 07.06.2025).
2. Сивков А.С., Шумаков В.В., Мамонов Р.И. Исследование свойств мела АО «Лебединский ГОК» / *Научное сообщество*

- щество студентов XXI столетия. Технические науки: Сборник статей по материалам XLVIII Международной студенческой научно-практической конференции. 2016;11(47). URL: [https://sibac.info/archive/technic/11\(47\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/11(47).pdf) (дата обращения 07.06.2025).
3. Сивков А.С., Шилов А.А. Исследование физико-механических характеристик мела и известняка с целью использования мела как сырья для производства извести / Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: Сборник статей по материалам LXI Международной студенческой научно-практической конференции. 2018;1(60). URL: [https://sibac.info/archive/technic/1\(60\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/1(60).pdf) (дата обращения 07.06.2025).
 4. Mikulcic H., Berg E.V., Vujanovic M., Priesching P., Perkovic L., Tatschl R., Duic N. Numerical modelling of calcination reaction mechanism for cement production. *Chemical Engineering Science*. 2012;69(1):607–615. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.11.024>
 5. Sinhal K., Ghoshdastidar P.S., Dasgupta B. Computer simulation of drying of food products with superheated steam in a rotary kiln. *ASME Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 2012;4(1):011009. <https://doi.org/10.1115/1.4005256>
 6. Li S.Q., Ma L.B., Wan W., Yao Q. A mathematical model of heat transfer in a rotary kiln thermo-reactor. *Chemical Engineering Technology*. 2005;28(12):1480–1489. <https://doi.org/10.1002/ceat.200500241>
 7. Guo Y.C., Chan C.K., Lau K.S. Numerical studies of pulverized coal combustion in a tubular coal combustor with slanted oxygen jet. *Fuel*. 2003;82(8):893–907. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00367-8](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00367-8)
 8. Сивков А.С., Шумаков В.В., Мамонов Р.И. Возможность использования мела для производства извести, применяемой в металлургии / Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: Сборник статей по материалам XLVI Международной студенческой научно-практической конференции. 2016;9(45). URL: [https://sibac.info/archive/technic/9\(45\).pdf](https://sibac.info/archive/technic/9(45).pdf) (дата обращения 07.06.2025).
 9. Монастырев А.В. Производство извести. Москва: Высшая школа; 1971:272.
 10. Монастырев А.В., Галиахметов Р.Ф. Печи для производства извести. Воронеж: Истоки; 2011:392.
 11. Пат. 2079785 RU. Газовая горелка / Калашников Л.В., Калашников Г.Л.; заявл. 13.04.1995; опубл. 20.05.1997.
 12. Селиванов Н.И. Технология и оборудование для производства строительных материалов. Москва: Высшая школа; 2005:366.
 13. Алексеев А.Д. Теория и практика обжига известняка во вращающихся печах. Москва: Металлургия; 1973:344.
 14. Ансимов А.А., Меркер Э.Э., Харламов Д.А., Кочетов А.И., Казарцев В.О. Исследование теплоотдачи факела и оптимизация режима обжига во вращающейся печи. *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2013;(2-1(47)):5–9.
- Ansarov A.A., Merker E.E., Kharlamov D.A., Kochetov A.I., Kazartsev V.O. Studying the heat transfer of the torch and optimization of the regime of firing in the revolver. *Bulletin of Cherepovets State University*. 2013; (2-1(47)):5–9. (In Russ.).
15. Меркер Э.Э., Харламов Д.А., Ансимов А.А. Повышение эффективности сжигания топлива во вращающихся печах обжига извести. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 1995;(5):28–30.
- Merker E.E., Kharlamov D.A., Ansarov A.A. Increasing the efficiency of fuel combustion in rotary kilns for lime roasting. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 1995;(5):28–30. (In Russ.).
16. Шелудяк Б.Л. Технология производства извести. Москва: Стройиздат; 1988:272.
 17. Алексеев А.Д. Теория и практика обжига известняка во вращающихся печах. Москва: Металлургия; 2018:344.
 18. Кузнецов Н.В., Баскаков А.П. Теплотехника. Москва: Энергоатомиздат; 2018:479.
 19. Mastorakos E., Massias A., Tsakiroglou C.D., Goussis D.A., Burganos V.N. CFD predictions for cement kiln including flame modelling, heat transfer and clinker chemistry. *Applied Mathematical Modelling*. 1999;23(1):55–76. [https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(98\)10053-7](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(98)10053-7)
 20. Mujumdar K.S., Ganesh K.V., Kulkarni S.V., Ranade V.V. Rotary cement kiln simulator (RoCKS): Integrated modeling of pre-heater, calciner, kiln and clinker cooler. *Chemical Engineering Science*. 2007;62(9):2590–2607. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.01.063>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Александр Сергеевич Сивков, аспирант кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

E-mail: sivkovsasha777@yandex.ru

Светлана Игоревна Чибизова, к.т.н., доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

ORCID: 0000-0002-9444-5670

E-mail: s.chibizova@misys.ru

Анна Дмитриевна Апасова, аспирант кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

E-mail: annhope@bk.ru

Aleksandr S. Sivkov, Postgraduate of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: sivkovsasha777@yandex.ru

Svetlana I. Chibizova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”

ORCID: 0000-0002-9444-5670

E-mail: s.chibizova@misys.ru

Anna D. Apasova, Postgraduate of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: annhope@bk.ru

Вклад авторов

Contribution of the Authors

А. С. Сивков – выделение направлений оптимизации, разработка и применение модели теплового расчета, проведение экспериментов, оценка экологических и экономических эффектов.

С. И. Чибизова – выделение направлений оптимизации, проведение экспериментов.

А. Д. Апасова – аналитический обзор, описание научной новизны и практической значимости.

A. S. Sivkov – highlighting areas of improvement, development and application of a thermal calculation model, conducting experiments, assessment of environmental and economic effects.

S. I. Chibizov – highlighting areas of improvement, conducting experiments.

A. D. Apasov – analytical review, description of scientific novelty and practical significance.

Поступила в редакцию 26.03.2025

После доработки 29.04.2025

Принята к публикации 23.06.2025

Received 26.03.2025

Revised 29.04.2025

Accepted 23.06.2025



УДК 669.162.263

DOI 10.17073/0368-0797-2025-4-402-410



Оригинальная статья

Original article

ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Н. А. Спирин[✉], И. А. Гурин, В. В. Лавров

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

n.a.spirin@urfu.ru

Аннотация. В статье рассматривается разработка информационно-моделирующей системы оценки неустойчивости функционирования доменной печи. Представленный подход базируется на применении математических моделей и методов анализа параметров доменного процесса, что позволяет оценивать влияние технологических и организационных факторов на стабильность работы печи. Разработанная система предназначена для автоматизированного сбора, обработки и анализа данных в реальном времени, а также прогнозирования технологических отклонений. В основе методики лежит использование интегральных показателей стабильности, включая технико-экономические характеристики плавки, свойства сырья, параметры дутьевого, газодинамического, теплового и шлакового режимов. Для расчета интегральных показателей применяется совокупность контролируемых и расчетных признаков, ранжированных по степени значимости. Основные модули системы включают функциональные блоки сбора данных, расчетов, анализа и визуализации. Архитектура системы реализована на основе клиент-серверного подхода, что обеспечивает возможность интеграции с существующими системами управления металлургическим производством. Практическая реализация системы позволяет улучшить показатели производительности доменной плавки, снизить колебания параметров технологического процесса и повысить качество получаемого чугуна. Приведенные примеры расчетов подтверждают эффективность разработанного инструмента. Представленные результаты могут быть полезны для специалистов в области автоматизации доменного производства, а также для исследователей, занимающихся анализом и прогнозированием неустойчивости технологических процессов.

Ключевые слова: доменная печь, моделирование, неустойчивость, информационная система, металлургия, математическая модель

Для цитирования: Спирин Н.А., Гурин И.А., Лавров В.В. Информационно-моделирующая система оценки неустойчивости функционирования доменной печи. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(4):402–410. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-402-410>

INFORMATION MODELING SYSTEM FOR ASSESSING INSTABILITY OF BLAST FURNACE FUNCTIONING

N. A. Spirin[✉], I. A. Gurin, V. V. Lavrov

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (28 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

n.a.spirin@urfu.ru

Abstract. The article discusses the development of an information modeling system for assessing the instability of a blast furnace. The presented approach is based on the application of mathematical models and methods for analyzing the parameters of the blast furnace process, which makes it possible to assess the impact of technological and organizational factors on the furnace stability. The developed system is designed for automated collection, processing and analysis of data in real time, as well as forecasting technological deviations. The methodology is based on the use of integral stability indicators, including the technical and economic characteristics of smelting, the properties of raw materials, the parameters of blast, gas dynamic, thermal and slag modes. To determine the integral indicators, a set of controlled and calculated features is used, ranked according to the degree of significance. The main modules of the system include functional blocks for data collection, calculations, analysis and visualization. The system architecture is implemented on the basis of a client-server approach, which provides the possibility of integration with existing metallurgical production management systems. The practical implementation of the system makes it possible to improve the performance of blast furnace smelting, reduce fluctuations in the parameters of the technological process and improve the quality of the resulting cast iron. The above

calculation examples confirm effectiveness of the developed tool. The presented results may be useful for the specialists in the field of blast furnace production automation, as well as for the researchers involved in analysis and forecasting of instability of technological processes.

Keywords: blast furnace, modeling, instability, information system, metallurgy, mathematical model

For citation: Spirin N.A., Gurin I.A., Lavrov V.V. Information modeling system for assessing instability of blast furnace functioning. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(4):402–410. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-402-410>

ВВЕДЕНИЕ

Целью создания информационных систем и систем управления доменными печами является разработка эффективной системы управления, которая обеспечивает стабильную работу производства при минимальных затратах, учитывает требования технологии и особенности оборудования. Для развития автоматизированной системы анализа параметров работы отдельных печей и доменного цеха разрабатывается информационно-моделирующая система оценки неустойчивости функционирования доменных печей [1].

Влияние колебаний состава шихты [2 – 4] и параметров плавки [5 – 7] на показатели работы доменной печи обусловлено тем, что вызванные колебания состава и температуры чугуна, а также потери напора газа в столбе шихты способствуют выходу отдельных величин за пределы ограничений, обусловленных требованиями к составу чугуна, а также необходимостью поддержания ровного хода печи при любых колебаниях параметров противотока [8; 9]. Группа факторов, непосредственно влияющих на тепловое состояние печи, температуру и состав чугуна: содержание железа в шихте, влажность и зольность кокса, температура и влажность дутья, расход природного газа, соотношение масс загружаемых железорудных материалов и кокса и их распределение на колошнике [10 – 12]. Колебания указанных параметров приводят к колебаниям теплового баланса печи и соответствующим отклонениям от средних значений содержания кремния в чугуне и его температуры. Появление неустойчивости процесса плавки при использовании железорудного сырья с изменяющимся химическим составом существенно снижает качество жидких продуктов доменной плавки. Так, согласно справочным данным [5] снижение колебаний основности агломерата (CaO/SiO_2) на $\pm(0,075 - 0,100)$ ед. сопровождается увеличением производительности доменной печи на 1,5 % и снижением удельного расхода кокса на 0,8 %.

Общая величина возможного эффекта от уменьшения колебаний параметров доменной плавки оценивается экономией кокса 5 – 6 % и приростом производительности 9 – 10 %. Снижение среднеквадратичного отклонения содержания железа в шихте на 0,1 % приводит к экономии кокса 0,28 % при увеличении производительности на 0,29 % [2]. К организационным факторам технологии относятся, в частности, остановки, тихий ход доменных печей, ритмичность загрузки

шихты и выпуска жидких продуктов плавки. Влияние ряда отдельных организационных факторов изучены недостаточно, и оценивать их влияние предложено на основе эмпирических данных [13 – 15]. К ним относятся: механические и физико-химические свойства сырья и кокса, газораспределение в печи и др. Для такой оценки требуется дальнейшее изучение и развитие математического описания процесса.

Однако существующие системы часто оказываются недостаточно точными или не могут в полной мере учитывать все факторы, влияющие на стабильность процесса. Это делает необходимым создание информационно-моделирующих систем, способных учитывать множество переменных и оперативно анализировать неустойчивость работы доменных печей.

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Для оценки стабильности процесса разработаны следующие основные интегральные показатели (B_1):

1. Техничко-экономические и технологические показатели плавки (B_1).
2. Показатели свойств сырья (железорудных материалов, кокса, флюсов) (B_2).
3. Показатели дутьевого и газодинамического режимов (B_3).
4. Показатели теплового режима (B_4).
5. Показатели шлакового режима (B_5).
6. Интегральный показатель стабильности работы доменной печи по B_3, B_4, B_5 , характеризующий дутьевой, газодинамический, тепловой и шлаковый режимы ($B_{\text{дп}}$).
7. Итоговый показатель стабильности свойств сырья и работы доменной печи ($B_{\text{итог}}$).

При этом виды признаков и их количество определяются видом интегрального показателя.

Для оценки стабильности процесса, кроме контролируемых параметров, используется и комплекс расчетных параметров, характеризующих дутьевой, газодинамический, тепловой и шлаковый режимы, технологические параметры доменной плавки, представленные в работах [16 – 18].

Ориентировочное количество признаков для оценки каждого из интегральных показателей представлено в таблице.

За заданный интервал времени работы доменной печи для расчета каждого из интегральных показателей (B_1) в качестве исходных данных используются

Количество признаков, используемых для расчета показателей стабильности работы печи

Number of features used to calculate the stability indicators of the furnace operation

Обозначение	Наименование показателя	Количество признаков		
		Контролируемых	Расчетных	Всего
B_1	Технико-экономические и технологические показатели плавки	6	6	12
B_2	Свойства сырья (железородных материалов, кокса, флюсов)	16	0	16
Показатели стабильности работы печи				
B_3	Дутьевой и газодинамический режимы	9	10	19
B_4	Тепловой режим	4	7	11
B_5	Шлаковый режим	6	4	10
Итого признаков		41	27	68

среднеквадратичные отклонения контролируемых и расчетных признаков ΔX_i .

При стабильном режиме работы среднеквадратичное отклонение i -го признака ΔX_i , характеризующего стабильность работы печи в заданном периоде, не должно превышать допустимого значения $\Delta X_i^{\text{доп}}$, которое является настройкой модели:

$$\Delta X_i \leq \Delta X_i^{\text{доп}}. \quad (1)$$

Если условие (1) выполняется («Истина»), то значению i -го идентификатора признака P_i присваивается значение «1», в противном случае («Ложь») – значение «0». При этом все признаки ранжируются. Каждому из них присваивается значение его ранга R_i , изменяющегося в диапазоне от «0» до «1», определяемого методом экспертного оценивания.

Вероятность стабильности работы доменной печи по каждому j из указанных интегральных показателей B_j рассчитывается по следующему соотношению:

$$B_j = \left(\frac{\sum_{i=1}^n P_i \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \right) \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где n – количество признаков каждого из интегральных показателей B_j .

Если вероятность B_j более 80 % (нормативно-справочная информация), то по данному интегральному показателю наблюдалась стабильность работы доменной печи.

Если вероятность B_j находится в диапазоне от 60 до 80 %, то присутствует нестабильность работы доменной печи по данному интегральному показателю.

Если вероятность B_j менее 60 %, то доменная печь работала нестабильно по данному интегральному показателю.

Для определения итоговых критериев, характеризующих стабильность условий и работу доменной печи, рассчитываются следующие интегральные показатели:

– интегральный показатель стабильности работы доменной печи $B_{\text{ДП}}$ (по показателям B_3, B_4, B_5), характеризующий дутьевой, газодинамический, тепловой, шлаковый режимы:

$$B_{\text{ДП}} = \left(\frac{\sum_{i=3}^5 B_i \frac{R_i}{\sum_{i=3}^5 R_i} \right) \cdot 100 \%, \quad (3)$$

– итоговый показатель стабильности работы печи:

$$B_{\text{итог}} = \frac{B_1 R_1 + B_2 R_2 + B_{\text{ДП}} R_{\text{ДП}}}{R_1 + R_2 + R_{\text{ДП}}}.$$

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ

Основные требования к системе:

- автоматизация сбора данных: система должна собирать данные о параметрах работы доменной печи в режиме реального времени;
- оперативная визуализация: система должна предоставлять результаты анализа в виде графиков, таблиц и диаграмм, понятных технологическому персоналу;
- простота интеграции с другими системами: разработанная система должна быть легко интегрирована в существующие системы управления предприятия.

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

При проектировании информационной системы использованы методология функционального моделирования и графическая нотация метода структурного анализа и проектирования IDEF0. В основе IDEF0 лежит методология структурного анализа и проектирования SADT (*Structural Analysis and Design Technique*) [19 – 21]. Модель, разработанная с использованием пакета Ramus Educational [21], содержит более 50 блоков на четырех уровнях декомпозиции, которые определяют основные функции и взаимосвязи

между отдельными функциональными блоками системы, управляющие воздействия и механизмы выполнения каждой функции.

АРХИТЕКТУРА ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Архитектура разработанной информационно-моделирующей системы оценки нестабильности функционирования доменной печи представлена на рис. 1. Информационно-моделирующая система разбита на небольшие независимые блоки – модули, которые реализуют функционально законченные фрагменты программы. Данный подход обусловлен возможностью обновления функционала программных модулей без необходимости во внесении изменений во всю систему, что делает ее более надежной и масштабируемой. Роль модулей выполняют математические библиотеки и классы [22].

Информационно-моделирующая система состоит из следующих модулей:

– модуль ввода допустимых значений среднеквадратичных отклонений параметров и их рангов $\Delta X_{i}^{\text{доп}}$, R_i ;

– модуль расчета среднеарифметических значений и среднеквадратичных отклонений параметров, характеризующих: технико-экономические и технологические показатели плавки, свойства сырья (железорудных материалов, кокса, флюсов), дутьевой и газодинамический режимы, тепловой режим, шлаковый режим;

– модуль расчета вероятностей стабильности работы доменной печи по каждому j из интегральных показателей B_j , интегрального показателя стабильности работы доменной печи $B_{\text{ДП}}$ и итогового показателя стабильности работы доменной печи $B_{\text{итог}}$;

– модуль анализа и представления результатов.

Анализ полученных результатов выполняется из расчетных модулей. Результаты отображаются в численном и графическом виде, имеется возможность формирования и экспорта отчета в файл формата Microsoft Excel.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Программная реализация информационной системы выполнена с использованием «клиент-серверного» под-

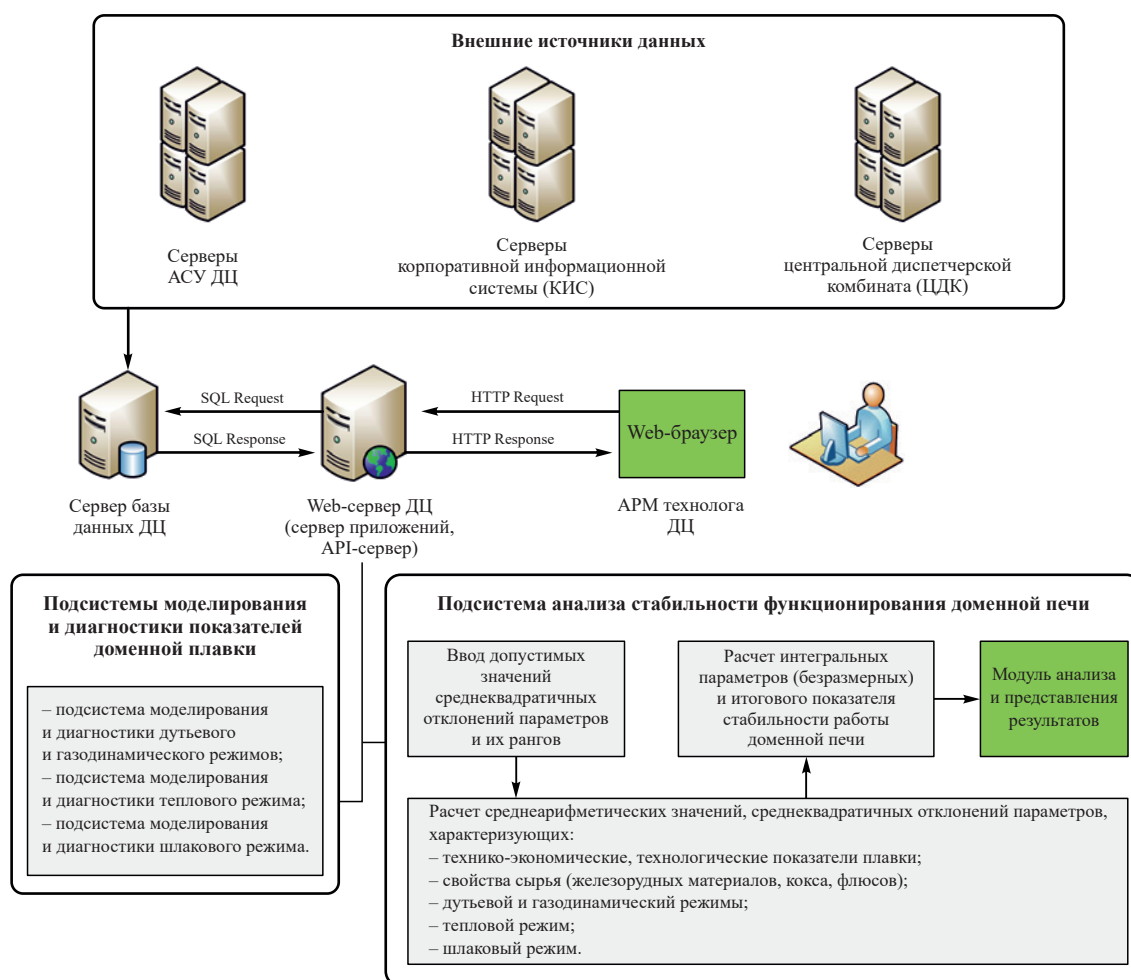


Рис. 1. Архитектура информационно-моделирующей системы оценки нестабильности функционирования доменной печи

Fig. 1. Architecture of the information modeling system for assessing the instability of a blast furnace

хода с учетом возможностей интеграции с существующими программными продуктами, используемыми на предприятии, и обмена данными с использованием программного интерфейса API (*Application Programming Interface*) [23]. Клиент-серверная архитектура представляет собой классическую трехзвенную архитектуру, состоящую из уровня представления, уровня приложения и уровня данных.

Уровень представления реализован с помощью высокоуровневых языков программирования JavaScript, языка гипертекстовой разметки HTML5 и каскадных таблиц стилей CSS (*Cascading Style Sheets*). Визуальное оформление выполнено с использованием фреймворка Bootstrap. Разработка пользовательского интерфейса выполнена с использованием фреймворка UmiJS и библиотек React, построение графиков осуществляется библиотекой Ant Design Charts. Данный уровень поддерживается с помощью вычислительных ресурсов пользователей – веб-браузеров.

Уровень приложения реализован на языке программирования C# на базе фреймворка ASP.NET Core MVC с использованием программной платформы .NET 8 [24]. ASP.NET Core выполняет конвейерную обработку запросов пользователей, части конвейера – это Middleware. Информационная система включает в себя Middleware обработки ошибок, Middleware аутентификации и авторизации, Session Middleware и Middleware Web API.

Middleware обработки ошибок позволяет системе сигнализировать о проблемах с программным обеспечением при возникновении исключительных ситуаций, а также продолжать свою работу и корректно отображать веб-страницы при ошибках подключения к базе данных, ошибках при выполнении алгоритмов расчета и т. д.

Middleware аутентификации служит для внедрения в разрабатываемую информационную систему стандартного механизма аутентификации и авторизации ASP.NET Identity, а также управления учетными записями.

Session Middleware обрабатывает временные данные пользователей, с которыми они работают во время использования системы.

Middleware Web API встраивает систему маршрутизации, систему внедрения зависимостей, а также привязку моделей и валидацию данных.

Уровень данных состоит из базы данных и программы для управления доступом для чтения и записи в базе данных. В качестве базы данных для разработанной системы используется СУБД PostgreSQL. Связь системы с базой данных осуществляется с помощью технологии Entity Framework Core, которая, в свою очередь, использует технологию программирования ORM (*Object-Relational Mapping*), применяемую в объектно-ориентированных языках программирования для

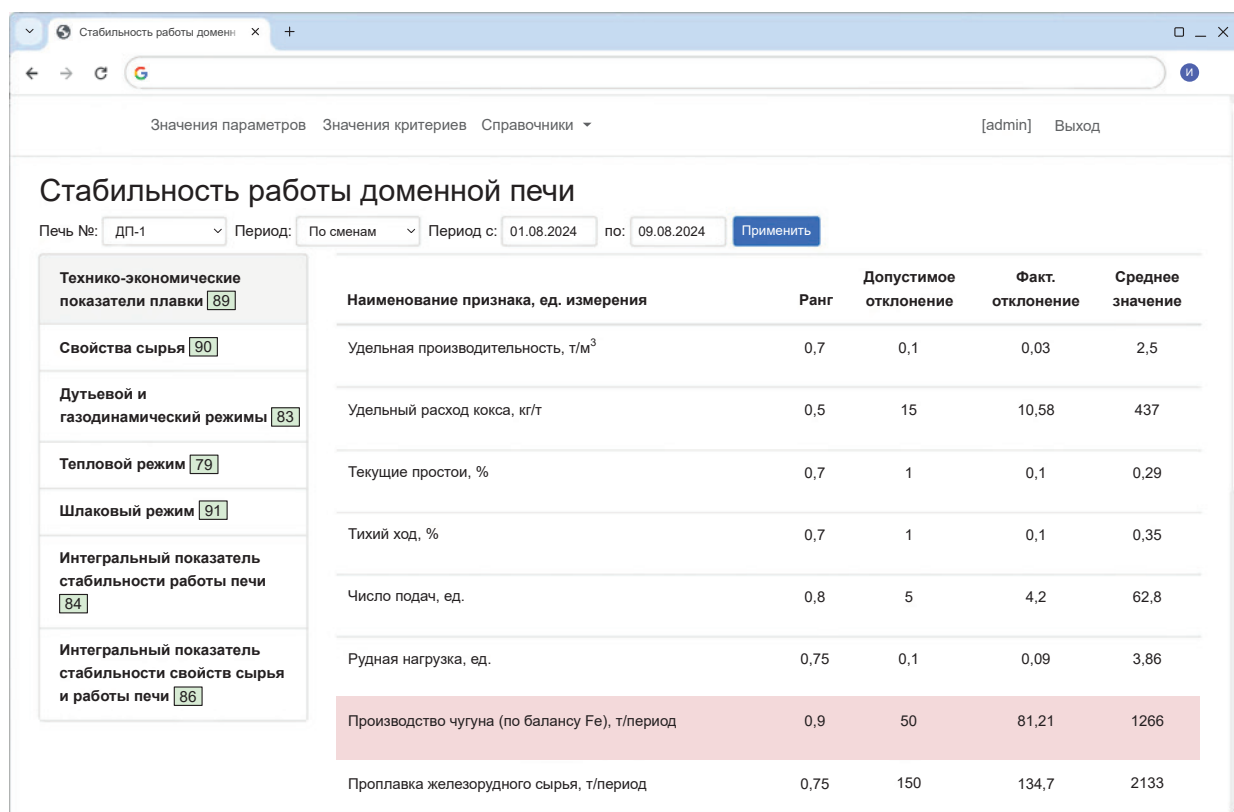


Рис. 2. Фрагмент веб-страницы оценки нестабильности технико-экономических и технологических показателей доменной печи

Fig. 2. Fragment of a web page for assessing the instability of technical, economic and technological indicators of a blast furnace

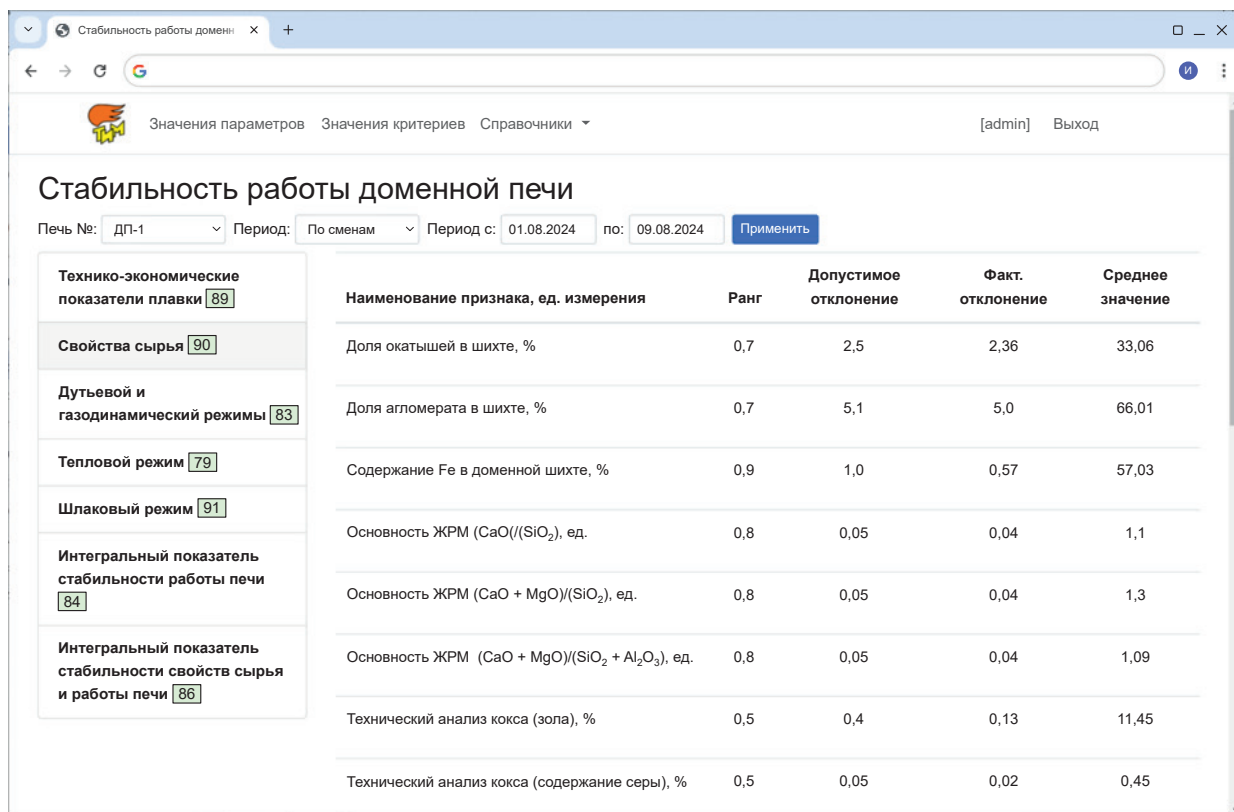


Рис. 3. Фрагмент веб-страницы оценки нестабильности свойств сырья (железорудных материалов, кокса, флюсов)

Fig. 3. Fragment of a web page for assessing the instability of raw material properties (iron ore materials, coke, fluxes)

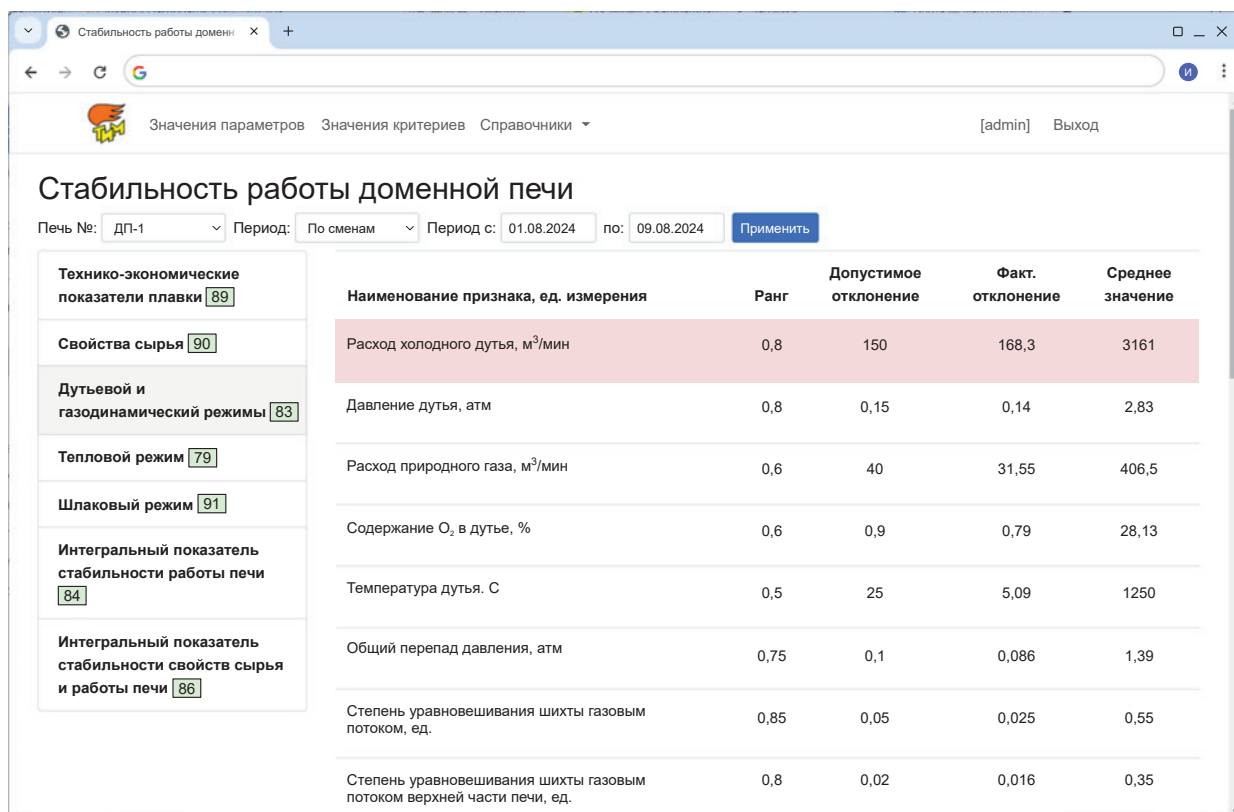


Рис. 4. Фрагмент веб-страницы оценки нестабильности показателей дутьевого и газодинамического режимов доменной печи

Fig. 4. Fragment of a web page for assessing the instability of indicators of blast and gas dynamic modes of a blast furnace

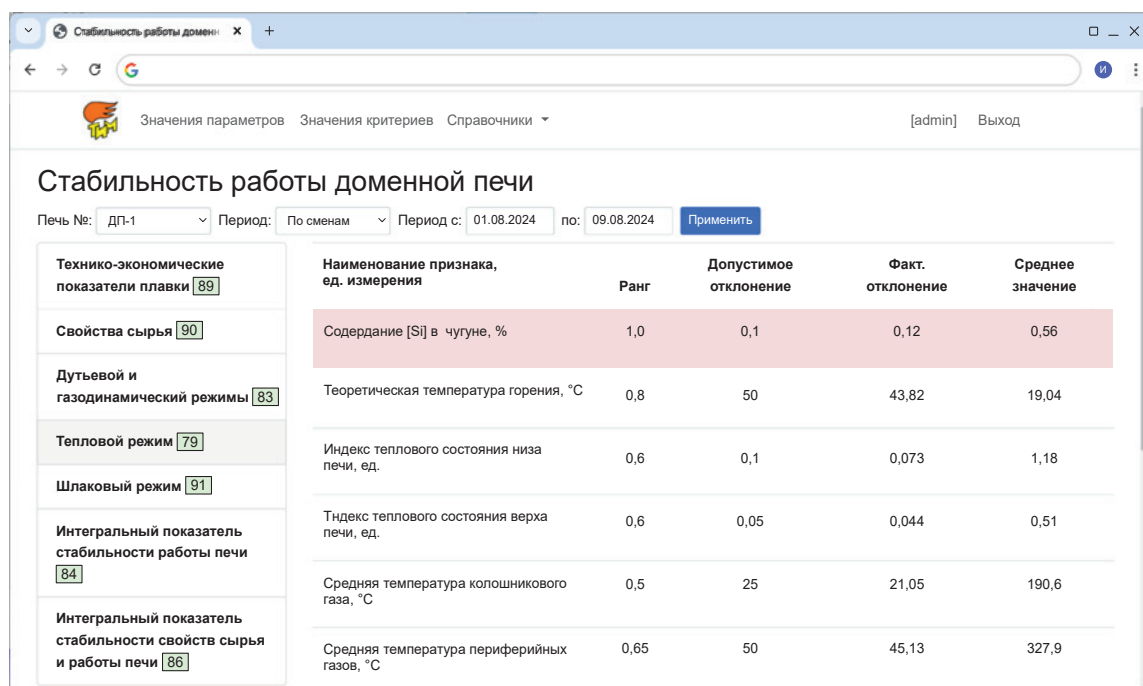


Рис. 5. Фрагмент веб-страницы оценки нестабильности показателей теплового режима

Fig. 5. Fragment of a web page for assessing the instability of thermal mode indicators

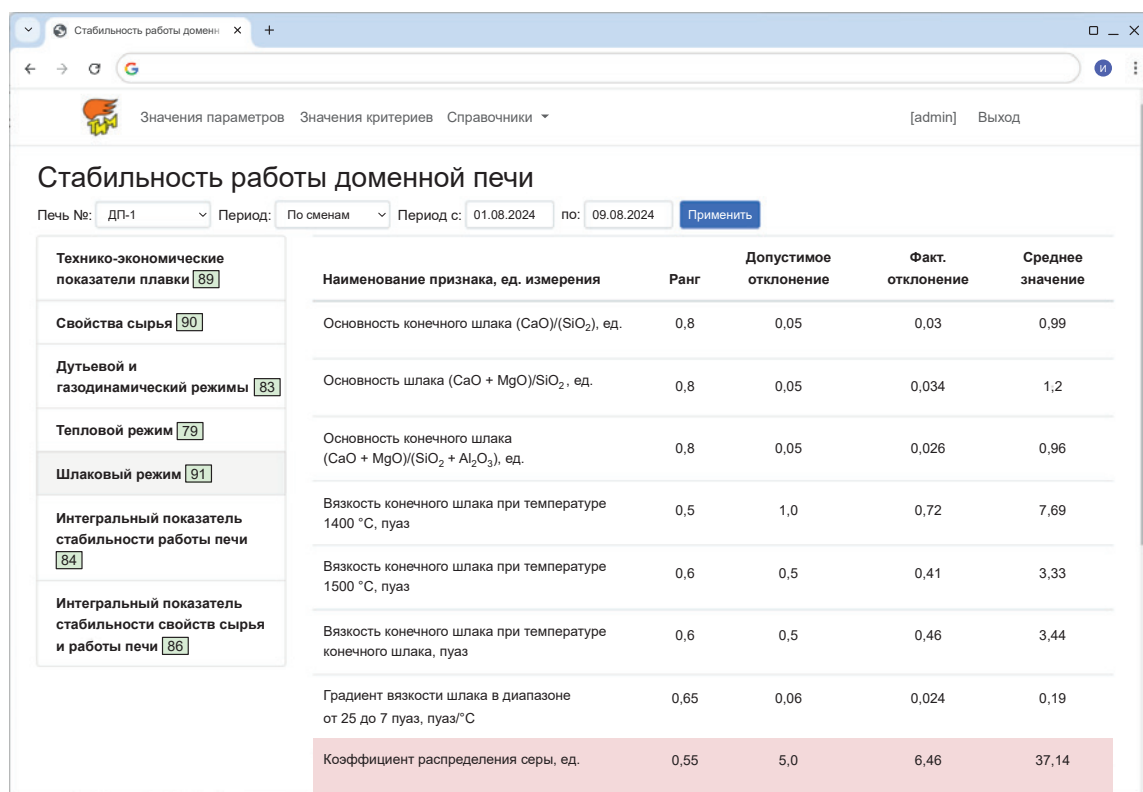


Рис. 6. Фрагмент веб-страницы оценки нестабильности показателей шлакового режима

Fig. 6. Fragment of a web page for assessing the instability of slag mode indicators

создания виртуальных схем баз данных. Она позволяет манипулировать данными на уровне объектов или классов. Ввод исходных данных о работе доменной печи за

период может осуществляться как через программный интерфейс и интеграцию с системами АСУ ТП доменных печей, так и вручную.

ОПИСАНИЕ ФУНКЦИЙ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Разработанный программный модуль позволяет:

1. Выбирать нужные периоды работы с помощью календаря (возможность выбора продолжительности периода для усреднения данных – час, смена, сутки, неделя, выпуск).
2. Выбирать одну или несколько доменных печей, для которых будет выполняться анализ.
3. Проводить расчет средних значений комплекса показателей и их среднеквадратичных отклонений.
4. Получать результаты анализа в удобном виде (таблицы и гистограммы: каждая доменная печь может иметь свой цвет для базового и сравнительного периодов).
5. Получать уведомления, если значения за пределами допустимого диапазона (возможность настройки уведомлений для всех или для выбранных доменных печей).

На рис. 2 – 6 представлены фрагменты веб-страниц информационно-моделирующей системы с результатами моделирования оценки нестабильности работы доменной печи.

Результаты моделирования в рассматриваемом периоде показали стабильность работы при оценке технико-экономических и технологических показателей, свойств сырья, показателей дутьевого и газодинамического режимов, шлакового режима. При оценке теплового режима присутствовала нестабильность работы доменной печи. Значения интегральных показателей превышают 80 %, что показывает стабильность работы доменной печи.

Выводы

С использованием современных информационных технологий разработана информационно-моделирующая система оценки нестабильности функционирования доменной печи. Система обеспечивает автоматизированный сбор данных и их обработку, определяет комплекс параметров, характеризующих технико-экономические и технологические показатели плавки, свойства сырья, показатели теплового, дутьевого, газодинамического режимов и отработки жидких продуктов плавки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Спирин Н.А., Лавров В.В., Гурин И.А., Зубаков С.В. Оценка нестабильности функционирования доменной печи. В кн.: *Системы автоматизации (в образовании, науке и производстве) AS'2024. Труды Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием)*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ; 2024:167–171.
2. Товаровский И.Г. Доменная плавка. Днепропетровск: Пороги; 2009:768.
3. Товаровский И.Г., Меркулов А.Е. Аналитическое исследование процессов и режимов доменной плавки при различных содержаниях железа в шихте. *Черная метал-*

лургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2010;(4(1324)):19–27.

Tovarovsky I.G., Merkulov A.E. Analytical study of blast-furnace smelting processes and modes at various iron contents in the charge. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2010;(4(1324)): 19–27. (In Russ.).

4. Современный доменный процесс / М. Геердес, Р. Ченью, И. Курунов, О. Лингарди, Д. Риккетс. Москва: Металлургиздат; 2016:280.
5. Остроухов М.Я., Шпарбер Л.Я. Справочник мастера-доменщика. Москва: Металлургия; 1977:304.
6. Bolshakov V.I., Semenov Y.S., Ivancha N.G., Vishnyakov V.I., Shumelchik E.I., Podkorytov A.L., Semion I.Y., Kuznetsov A.M., Zubenko A.V. Study of the flow of burden materials and their distribution on the furnace top of a modern blast furnace. *Metallurgical and Mining Industry*. 2012;4(3):158–165.
7. Большаков В.И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. Киев: Наукова думка; 2007:411.
8. Большаков В.И., Муравьева И.Г., Семенов Ю.С. Прогнозирование теплового состояния горна доменной печи. *Сталь*. 2009;(5):7–9.
Bol'shakov V.I., Murav'eva I.G., Semenov Yu.S. Forecasting the thermal condition of blast furnace hearth. *Stal'*. 2009;(5):7–9. (In Russ.).
9. Бабарыкин Н.Н. Теория и технология доменного процесса. Магнитогорск: МГТУ; 2009:257.
10. Fojtik D., Tuma J., Faruzel P. Computer modelling of burden distribution in the blast furnace equipped by a bell-less top charging system. *Ironmaking & Steelmaking*. 2021;48(10):1226–1238.
<https://doi.org/10.1080/03019233.2021.1952829>
11. Cameron I., Sukhrum M., Lefebvre K., Davenport W. Blast Furnace Ironmaking: Analysis, Control and Optimization. 1st ed. Elsevier Science; 2019:828.
<https://doi.org/10.1016/C2017-0-00007-1>
12. Gordon Y., Izumskiy N., Matveienko G., Chaika O., Lebid V., Vyshinskya O. Diagnostics, optimization and mathematical models of coke-sinter-hot metal production process. In: *AISTech 2019 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*. 2019;2019:479–484.
<https://doi.org/10.33313/377/050>
13. Agrawal A., Agarwal M.K., Kothari A.K., Mallick S. A mathematical model to control thermal stability of blast furnace using proactive thermal indicator. *Ironmaking & Steelmaking*. 2019;46(2):133–140.
<https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1353765>
14. Ueda S., Natsui S., Nogami H., Yagi J., Ariyama T. Recent progress and future perspective on mathematical modeling of blast furnace. *ISIJ International*. 2010;50(7):914–923.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.914>
15. Taylor A.G. The application of principal component analysis for predicting blast furnace stability. *IFAC Proceedings Volumes*. 1998;31(23):223–226.
[https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)35884-6](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)35884-6)
16. Некоторые вопросы технологии, управления и диагностики доменной плавки: монография / А.В. Павлов, О.П. Онорин, Н.А. Спирин, В.В. Лавров, И.А. Гурин. Екатеринбург: АМК «День РА»; 2023:282.

17. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки: монография / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, А.В. Краснобаев, О.П. Онорин, И.Е. Косаченко. Екатеринбург: УрФУ; 2011:462.
18. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев, Л.Ю. Гилева, А.В. Краснобаев, В.С. Швыдкий, О.П. Онорин, К.А. Щипанов, А.А. Бурыкин; под ред. Н.А. Спирина. Екатеринбург: УрФУ; 2014:558.
19. Методология функционального моделирования IDEF0. Госстандарт России. Москва: ИПК «Издательство стандартов»; 2000:75.
20. Waissi G.R., Demir M., Humble J.E., Lev B. Automation of strategy using IDEF0 – A proof of concept. *Operations Research Perspectives*. 2015;2:106–113.
<https://doi.org/10.1016/j.orp.2015.05.001>
21. Попов А.И. Свободные инструменты проектирования информационных систем. Москва: ИПК «Издательство стандартов»; 2014:78.
22. Гурин И.А., Лавров В.В., Спирин Н.А., Никитин А.Г. Веб-технологии построения автоматизированных информационно-моделирующих систем технологических процессов в металлургии. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2017;60(7):573–579.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-7-573-579>
Gurin I.A., Lavrov V.V., Spirin N.A., Nikitin A.G. Web-technologies for construction of automated information-modeling systems of technological processes in metallurgy. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017;60(7):573–579. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-7-573-579>
23. Перальта Х. Микросервисы и API. Санкт-Петербург: Питер; 2024:464.
Peralta J.H. Microservice APIs in Python: Using Python, Flask, Fastapi, Openapi and More. [Manning Publications; 2023:425.
24. Прайс М. C# 10 и .NET 6. Современная кросс-платформенная разработка, 6-е изд.: пер. с англ. Санкт-Петербург: Питер; 2023:848.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Николай Александрович Спирин, 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

Иван Александрович Гурин, 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

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

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

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

ORCID: 0000-0002-4989-7029

E-mail: ivan.gurin@urfu.ru

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

Вклад авторов

Contribution of the Authors

Н. А. Спирин – идея статьи, обоснование актуальности темы, подготовка концепции, развернутого плана и чернового варианта статьи, подготовка примеров практической реализации современных информационных систем в промышленности, подбор библиографических ссылок, окончательная правка, подготовка заключения.

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

В. В. Лавров – проработка содержания основных разделов, подбор и проверка библиографических ссылок, подготовка материалов статьи к публикации.

N. A. Spirin – creating the article idea, justifying the topic relevance, conceptualization, preparing a detailed plan and draft version of the article, preparing examples of practical implementation of modern information systems in industry, selecting references, final editing, preparing a conclusion.

I. A. Gurin – development of the sections content related to the development and software implementation of modern information systems in metallurgy, preparing abstracts and keywords, translation of the article materials into English.

V. V. Lavrov – development of the main sections content, selection and verification of references, preparing of the article materials for publication.

Поступила в редакцию 22.02.2025

После доработки 21.03.2025

Принята к публикации 24.03.2025

Received 22.02.2025

Revised 21.03.2025

Accepted 24.03.2025



УДК 669.162.212.9:669.162.211.1

DOI 10.17073/0368-0797-2025-4-411-416



Оригинальная статья

Original article

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОСТОЯНИЯ ФУТЕРОВКИ ГЛАВНОГО ЖЕЛОБА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

А. Н. Дмитриев¹, Д. А. Витькин², М. О. Золотых¹, Г. Ю. Витькина¹ ¹ Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)² АО «Калугин» (Россия, 620078, Екатеринбург, ул. Мира, 33)

20procents@mail.ru

Аннотация. Главный горновой желоб доменной печи – это сложная технологическая конструкция, играющая критическую роль в процессе выплавки чугуна. Он служит для отвода расплавленного чугуна и шлака из горна печи, обеспечивая непрерывность и безопасность процесса. Надежная работа желоба напрямую влияет на производительность доменной печи. Конструкция желоба должна выдерживать экстремально высокие температуры и агрессивную химическую среду, а его правильное функционирование требует постоянного контроля и обслуживания. Корректный выбор огнеупорных материалов, технологии футеровки, а также выявление возможности повышения стойкости огнеупорной футеровки главных горновых желобов и продления срока их службы определены своевременным получением информации о тепловой нагрузке на слои огнеупоров и кожух, об условиях эксплуатации, конструктивных особенностях и процессах разрушения огнеупоров при их взаимодействии с чугуном и шлаком. Системы контроля работы главного горнового желоба доменной печи призваны обеспечивать безопасную и эффективную его эксплуатацию, своевременно выявляя отклонения от нормального режима и предотвращая аварийные ситуации. Они включают в себя визуальный, инструментальный и автоматический контроль. Система мониторинга разгара главных горновых желобов позволит технологическому персоналу доменной печи контролировать состояние желобов, оценивать их остаточный ресурс и принимать своевременные решения об их ремонте. Разработанная математическая модель состояния футеровки главного желоба доменной печи учитывает термоконтроль кожухов горновых желобов в реальном времени. Она нацелена на получение оперативной информации по разгару главных горновых желобов и основана на решении задачи стационарной теплопроводности многослойной плоской стенки, каждый слой которой является однородной стенкой.

Ключевые слова: доменная печь, главный горновой желоб, математическое моделирование, термопара, разгар, футеровка, температура, контроль, алгоритм, теплопередача

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Института металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН.

Для цитирования: Дмитриев А.Н., Витькин Д.А., Золотых М.О., Витькина Г.Ю. Математическая модель состояния футеровки главного желоба доменной печи. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(4):411–416. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-411-416>

MATHEMATICAL MODEL OF THE BLAST FURNACE MAIN TROUGH LINING CONDITION

A. N. Dmitriev¹, D. A. Vit'kin², M. O. Zolotych¹, G. Yu. Vit'kina¹ ¹ Institute of Metallurgy named after Academician N.A. Vatolin, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (101 Amund-sena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)² JSC Kalugin (33 Mira Str., Yekaterinburg 620078, Russian Federation)

20procents@mail.ru

Abstract. The main trough of a blast furnace represents a complex technological structure that plays a critical role in the ironmaking process by draining molten cast iron and slag from the furnace hearth, thus ensuring the continuity and safety of the process. The reliable operation of the trough directly impacts the blast furnace productivity. The trough must be designed to withstand extremely high temperatures and aggressive chemical environments, and its proper functioning requires constant monitoring and maintenance. Selection of refractory materials and lining technology, as well as the potential for enhancing the resistance of refractory linings in the main mining troughs and extending their service life, are contingent on the timely acquisition of information regarding the thermal load on the refractory layers and casing, the operating conditions, design characte-

ristics, and destruction processes of refractories in interaction with cast iron and slag. The control systems of the blast furnace main mining trough are designed to ensure its safe and efficient operation, by detecting deviations from normal mode in a timely manner and preventing emergency situations. These systems include visual, instrumental and automatic control. The monitoring system of the main mining troughs heat-up will allow the blast furnace technological personnel to control the condition of troughs, estimate their remaining life and make timely decisions on their repair. The developed mathematical model of the blast furnace main trough lining condition takes into account real-time thermocontrol of the blast furnace mining trough casings. It is aimed at obtaining operative information on the main mining troughs heat-up, and is based on the solution of the problem of stationary heat conduction of a multilayer flat wall, each layer of which is a homogeneous wall.

Keywords: blast furnace, main mining trough, mathematical modelling, thermocouple, heating, lining, temperature, control, algorithm, heat transfer

Acknowledgements: The work was performed within the framework of the State assignment of the Institute of Metallurgy named after Academician N.A. Vatolin, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Dmitriev A.N., Vit'kin D.A., Zolotykh M.O., Vit'kina G.Yu. Mathematical model of the blast furnace main trough lining condition. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(4):411–416. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-411-416>

ВВЕДЕНИЕ

Система выпускных желобов доменной печи обычно включает главный желоб и разливочные желоба, при этом в главном желобе происходит отделение чугуна от шлака, в связи с чем он находится в наиболее тяжелых условиях. По этой причине совершенствованию его футеровки уделяют наибольшее внимание как изготовители огнеупорных материалов, так и потребители.

Количество имеющихся литературных данных, связанных с изучением теплообмена в футеровке главного горнового желоба, значительно меньше, чем данных, связанных с футеровкой внутри доменной печи. Однако в последние годы информация из иностранной литературы позволяет оценить усилия, приложенные для изучения данной проблематики.

В научных работах, посвященных исследованию разделения чугуна и шлака в главных желобах доменных печей, использовался широкий спектр методик, сочетающих экспериментальные и численные подходы [1–3]. Экспериментальные исследования, такие как в работах [4; 5], были проведены с помощью физического моделирования, при этом применялись аналогичные жидкости (например, масло и вода для имитации чугуна и шлака) для изучения влияния геометрических параметров желоба (угол наклона, форма поперечного сечения) и скорости выпуска расплава на эффективность разделения фаз. В работе [5], в частности, использована масштабная модель 1:10 для верификации результатов численного моделирования.

Численное моделирование играет ключевую роль в исследовании сложных процессов тепло- и массопереноса в желобе [6–9]. Исследователи применяли различные подходы к численному моделированию, такие как метод конечных объемов [7] и метод конечных элементов [8–11]), решая уравнения Навье-Стокса для описания гидродинамики потока и уравнения теплопроводности (с учетом излучения [11–13]) для моделирования температурного поля. Учтены факторы, влияющие на эффективность разделения и срок службы футеровки: турбулентность потока [7; 9], теплообмен между расплавом и огнеупором [14–17], тепловое излучение [10; 12; 13] и износ огнеупора [10].

В работе [7], например, была использована k – ϵ модель турбулентности, а в работах [10; 13] применялись нелокальные граничные условия для учета теплового излучения. В работе [8] авторы сосредоточили внимание на определении критических изотерм для повышения срока службы футеровки, используя двумерную модель теплообмена и сопоставляя результаты моделирования с экспериментальными данными. В работе [10] показано, что возможно применение разработки адаптивного регулятора шага времени для эффективного моделирования длительных циклов работы доменной печи.

Полученные результаты численного моделирования в большинстве случаев хорошо коррелировали с экспериментальными данными, позволяя выявлять области с максимальными температурами и напряжениями в футеровке [14–17], чаще всего в боковых стенках, и прогнозировать ее износ. Однако необходимо отметить наличие некоторой неопределенности, связанной, например, с точным расположением термопар для измерения температуры в работающем желобе [18–20], что требует применения дополнительных методов обработки данных (например, гибридный алгоритм GRSA [10]) для уточнения результатов. В целом, сочетание экспериментальных и численных методов позволило получить более полное представление о сложных процессах, происходящих в главных желобах доменных печей, и создать основу для разработки рекомендаций по оптимизации их конструкции и эксплуатации.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Данная работа посвящена разработке математической модели огнеупорной футеровки главного желоба доменной печи, проводимой в Институте металлургии УрО РАН. Представлен алгоритм расчета температурного поля в огнеупорной футеровке желоба на основании показаний термопар, установленных на внешней стороне металлического кожуха желоба.

На рис. 1 представлен общий вид (условно) сверху двух главных желобов доменной печи.

Футеровка главного горнового желоба в поперечном сечении представлена на рис. 2.

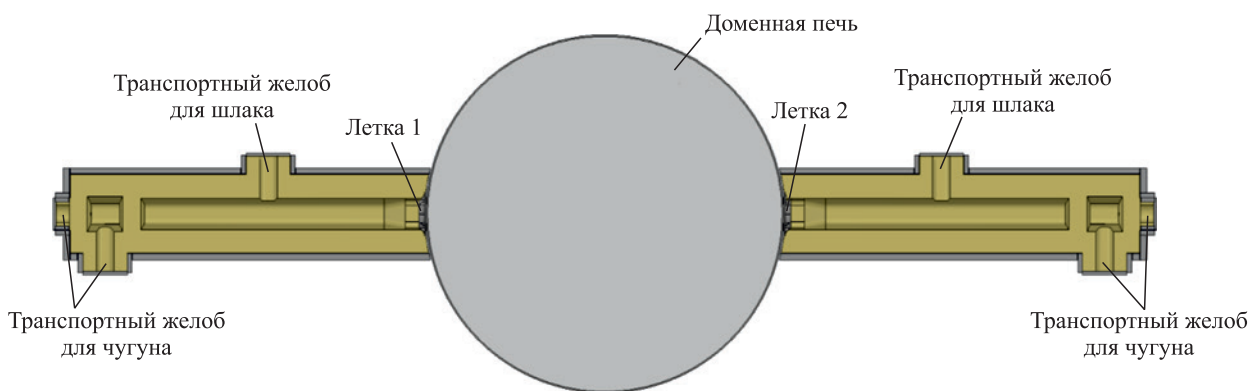


Рис. 1. Главные горновые желоба доменной печи

Fig. 1. Main mining troughs of the blast furnace

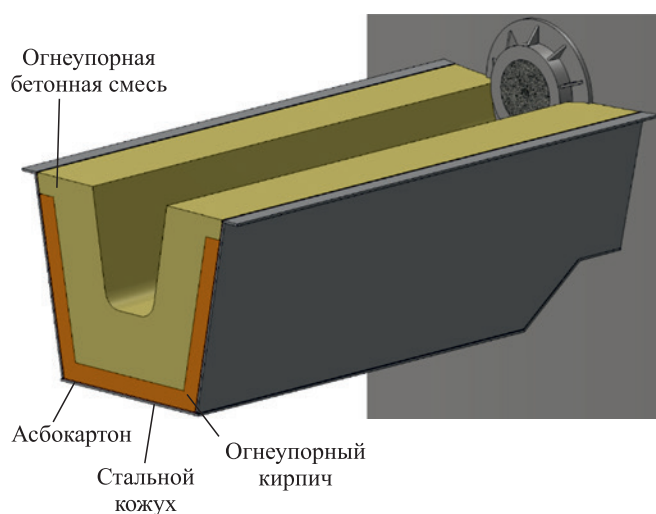


Рис. 2. Слои футеровки главного желоба в поперечном сечении

Fig. 2. Main trough lining layers in cross-section

РАСЧЕТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ЧЕРЕЗ МНОГОСЛОЙНУЮ ПЛОСКУЮ СТЕНКУ

Решение данной задачи сводится к стационарной теплопроводности многослойной плоской стенки, каждый слой которой является однородной стенкой. Предполагается, что общая толщина многослойной стенки, равная сумме толщин отдельных слоев, намного меньше высоты и ширины стенки. В этом случае изотермическими поверхностями являются плоскости, параллельные граничным плоскостям (в том числе и плоскости стыка между отдельными слоями). Отдельные слои стенки имеют гладкие граничные поверхности, плотно прилегающие друг к другу так, что температуры контактирующих поверхностей равны (рис. 3).

При рассмотрении теплопроводности однослойной стенки видно, что плотность теплового потока не изменяется при переходе от одной изотермической поверхности к другой при движении слева направо, т. е. вдоль оси x .

Плоскость стыка между первым и вторым слоями также представляет собой изотермическую поверхность с тем же значением плотности теплового потока, что и в первом слое. Но эта плоскость является «начальной» по отношению ко второму слою, в котором, следовательно, также установится постоянная по толщине плотность теплового потока q , равная плотности теплового потока в первом слое. Такие же рассуждения справедливы и для всех последующих слоев.

Тепловой поток и, соответственно, его плотность не изменяются по толщине плоской стенки ($Q \neq f(x)$ и $q \neq f(x)$) и поэтому для любого i -го слоя многослойной плоской стенки можно написать

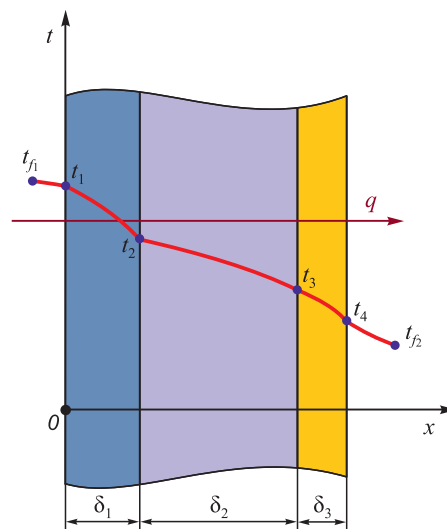


Рис. 3. Многослойная плоская стенка:

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – толщина первого, второго и третьего слоев соответственно; t_{f1}, t_{f2} – температуры горячего и холодного флюидов соответственно; t_1, t_4 – температуры на наружных границах; t_2, t_3 – температуры на плоскости раздела слоев

Fig. 3. Multilayer flat wall:

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – thickness of the first, second and third layers, respectively; t_{f1}, t_{f2} – temperatures of hot and cold fluids, respectively; t_1, t_4 – temperatures at the outer boundaries; t_2, t_3 – temperatures at the plane of the layers interface

$$q_s = \frac{\Delta T_i}{\frac{\delta_i}{\lambda_i}} = \text{const.} \quad (1)$$

Запишем это выражение последовательно для всех слоев, начиная с первого:

$$q_s = \frac{T_{f1} - T_1}{\frac{1}{\alpha_1}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{\delta_2}{\lambda_2}} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{T_4 - T_{f2}}{\frac{1}{\alpha_2}}. \quad (2)$$

Преобразуем полученные выражения в формат $q \frac{1}{\alpha_1} = T_{f1} - T_2$ и сложим полученные выражения (левые части с левыми, а правые – с правыми):

$$q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_2} \right) = T_{f1} - T_{f2}.$$

Данные выкладки справедливы и для большего количества слоев. Таким образом, в общем виде формула поверхностной плотности теплового потока (q_s) выглядит следующим образом:

$$q_s = \frac{T_{f1} - T_{f2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2} \right)}, \quad (3)$$

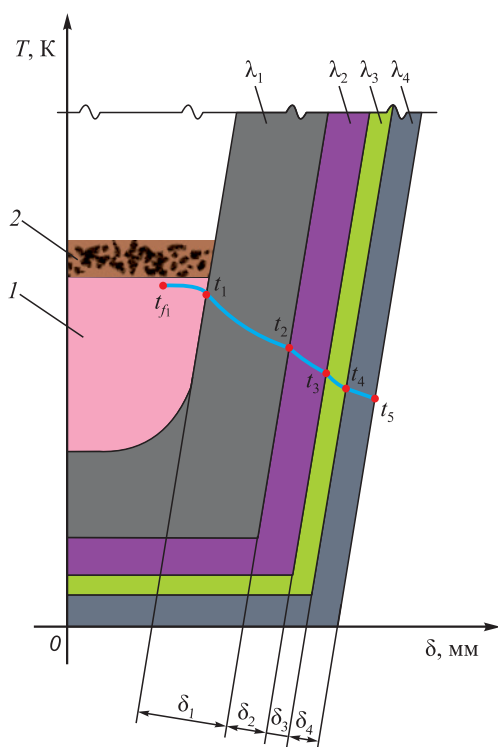


Рис. 4. Схема теплопередачи главного желоба:
1 – чугун; 2 – шлак

Fig. 4. Scheme of heat transfer of the main trough:
1 – cast iron; 2 – slag

где α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи от горячего флюида к стенке и от стенки к холодному флюиду соответственно, Вт/(м²·К); λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К).

На рис. 4 представлена схема теплопередачи для главного желоба доменной печи.

Контроль температуры осуществляется по термопарам, которые расположены на кожухе главного желоба. Футеровка главного желоба состоит из трех слоев огнеупорных материалов и заканчивается сталью кожуха, поэтому в данном случае формула поверхностной плотности теплового потока принимает вид:

$$q_l = \frac{T_{f1} - T_5}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4}}, \quad (4)$$

где T_{f1} – температура горячего флюида (чугун, шлак), К; T_5 – температура кожуха, контролируемая термопарой (теплосъем может идти с дискретностью от 10 с до 24 ч), К; α_1 – коэффициент теплоотдачи от горячего флюида к внутренней стенке желоба, Вт/(м²·К); $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ – толщина слоя огнеупорного материала от внутреннего к наружному соответственно, м; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – коэффициент теплопроводности огнеупорных материалов от внутреннего к наружному соответственно, Вт/(м·К).

В областях сопряжения теплофизические характеристики материалов усредняются.

БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМА РАСЧЕТА

Блок-схема алгоритма расчета изменения температуры по слоям футеровки приведена на рис. 5.

Выводы

Разработанная математическая модель состояния футеровки главного желоба доменной печи, основанная на решении задачи стационарной теплопроводности многослойной стенки, позволяет эффективно оценивать тепловую нагрузку на каждый слой огнеупоров и кожух в реальном времени (согласно настроенной дискретности теплосъема). Это обеспечивает оперативный контроль за состоянием футеровки, прогнозирование ее остаточного ресурса (толщины внутреннего слоя) и своевременное принятие решений о ремонте или замене, что напрямую способствует повышению эффективности и безопасности эксплуатации доменной печи, минимизируя риски аварийных ситуаций и увеличивая срок службы футеровки. Дальнейшие исследования будут направлены на усовершенствование модели, например, путем учета нестационарных тепловых процессов (ввода времени в модель), а также более сложных геометрических форм желоба.

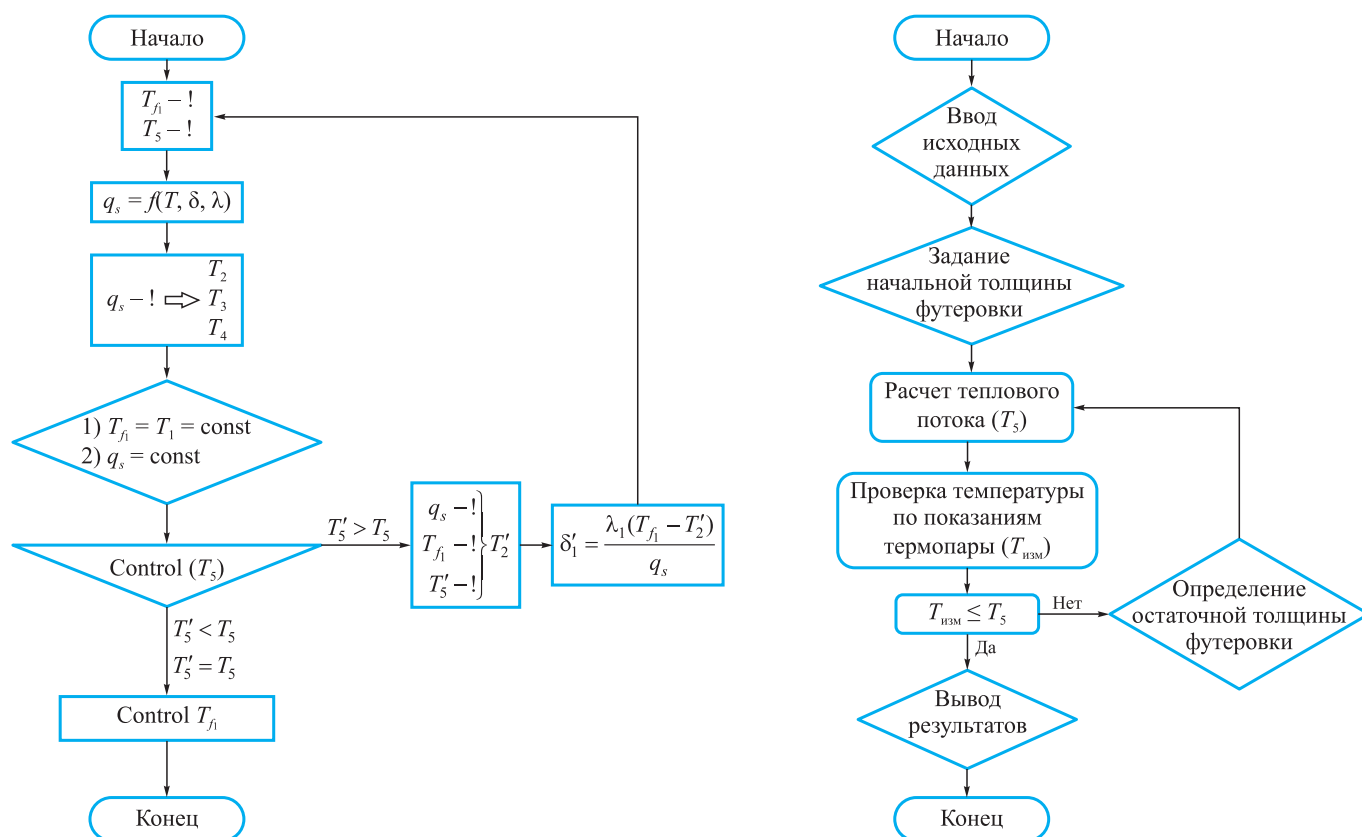


Рис. 5. Блок-схема и диаграмма алгоритма расчета изменения температуры по слоям футеровки главного желоба доменной печи

Fig. 5. Block diagram of the algorithm for calculation of temperature change by layers of the blast furnace main trough lining

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ranjan S., Mazumdar D., Chakraborty I.N., Sinha S., Sarkar R. Review and analysis of metallurgical processes in blast furnace main trough and trough performances. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2022;75:589–611. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02454-9>
2. Kostúr K. Mathematical model for optimisation of a thickness of furnace lining. In: *18th Int. Carpathian Control Conf. (ICCC)*. 2017:52–57. <https://doi.org/10.1109/CarpathianCC.2017.7970370>
3. Prompt N., Ouedraogo E. High temperature mechanical characterisation of an alumina refractory concrete for Blast Furnace main trough: Part I. General context. *Journal of the European Ceramic Society*. 2008;28(15):2859–2865. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.04.031>
4. Kim H., Ozturk B., Fruehan R.J. Slag-metal separation in the blast furnace trough. *ISIJ International*. 1998;38(5):430–439. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.38.430>
5. Monteiro de Oliveira M.J., Rodrigues G., Alves da Silva I., Peixoto J.J.M., da Silva C.A. Modeling of two-phase flow in blast furnace trough. *Steel Research International*. 2021;92(3):2000485. <https://doi.org/10.1002/srin.202000485>
6. Rezende R.V.P., Silva A.F.C., Maliska C.R. The blast furnace trough two-phase flow and its influence in the refractory lining wear: Mathematical modeling and numerical simulation. In: *Proceedings of the 19th Int. Congress of Mechanical Engineering*. 2007.
7. Ge Y., Li M., Wei H., Liang D. Numerical analysis on velocity and temperature of the fluid in a blast furnace main trough. *Processes*. 2020;8(2):249. <https://doi.org/10.3390/pr8020249>
8. Vázquez-Fernández S., Pieiga A.G.L., Lausín-González C., Quintela P. Mathematical modelling and numerical simulation of the heat transfer in a trough of a blast furnace. *International Journal of Thermal Sciences*. 2019;137:365–374. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.11.025>
9. Yao H., Chen H., Ge Y., Wei H. Numerical analysis on erosion and optimization of a blast furnace main trough. *Materials*. 2021;14(17):4851. <https://doi.org/10.3390/ma14174851>
10. Barral P., Pérez-Pérez L.J., Quintela P. Numerical simulation of the transient heat transfer in a blast furnace main trough during its complete campaign cycle. *International Journal of Thermal Sciences*. 2022;173:107349. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107349>
11. Barral P., Pérez-Pérez L.J., Quintela P. Transient 3D hydrodynamic model of a blast furnace main trough. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2023;17(1):2280776. <https://doi.org/10.1080/19942060.2023.2280776>
12. Barral P., Nicolás B., Pérez-Pérez L.J., Quintela P. Numerical simulation of wear related problems in a blast furnace runner. *Recent Advances in Differential Equations and Applications*. 2019;18:229–244. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00341-8_14
13. Barral P., Pérez-Pérez L.J., Quintela P. Transient thermal response with nonlocal radiation of a blast furnace

- main trough. *Applied Mathematical Modelling*. 2022;105: 197–225. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2021.12.029>
14. Kou M., Yao S., Wu S., Zhou H., Xu J. Effects of blast furnace main trough geometry on the slag-metal separation based on numerical simulation. *Steel Research International*. 2019;90(2):1800383. <https://doi.org/10.1002/srin.201800383>
 15. Wang L., Pan C.-N., Cheng W.-T. Numerical analysis on flow behavior of molten iron and slag in main trough of blast furnace during tapping process. *Advances in Numerical Analysis*. 2017;2017(1):713160. <https://doi.org/10.1155/2017/6713160>
 16. Luomala M.J., Paananen T.T., Kõykkä M.J., Fabritius J., Matti T., Nevala H., Härkki J.J. Modelling of fluid flows in the blast furnace trough. *Steel Research*. 2001;72(4): 130–135. <https://doi.org/10.1002/srin.200100096>
 17. He Q., Evans G., Zulli P., Tanzil F., Lee B. Flow characteristics in a blast furnace trough. *ISIJ International*. 2002;42(8):844–851. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.844>
 18. He Q., Zulli P., Tanzil F., Lee B., Dunning J., Evans G. Flow characteristics of a blast furnace taphole stream and its effects on trough refractory wear. *ISIJ International*. 2002;42(3):235–242. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.42.235>
 19. Shao L., Saxén H. A simulation study of Blast furnace hearth drainage using a two-phase flow model of the taphole. *ISIJ International*. 2011;51(2):228–235. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.228>
 20. Li Z., Wang H., Ding F., Tang H. Prolonging campaign life of blast furnace trough by water cooling. *Materials*. 2023;16(3):891. <https://doi.org/10.3390/ma16030891>

Сведения об авторах

Андрей Николаевич Дмитриев, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории пирометаллургии восстановительных процессов, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН
ORCID: 0000-0001-6446-0215
E-mail: andrey.dmitriev@mail.ru

Дмитрий Александрович Витькин, инженер-конструктор, АО «Калугин»
ORCID: 0009-0004-7023-5734
E-mail: dimantg85@rambler.ru

Максим Олегович Золотых, к.т.н., ведущий инженер лаборатории пирометаллургии восстановительных процессов, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН
ORCID: 0000-0002-8923-9872
E-mail: max@zolotykh.su

Галина Юрьевна Витькина, к.т.н., ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией пирометаллургии восстановительных процессов, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН
ORCID: 0000-0002-1076-2709
E-mail: 20procents@mail.ru

Information about the Authors

Andrei N. Dmitriev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Reduction Processes, Institute of Metallurgy named after Academician N.A. Vatolin, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0001-6446-0215
E-mail: andrey.dmitriev@mail.ru

Dmitrii A. Vit'kin, Design Engineer, JSC Kalugin
ORCID: 0009-0004-7023-5734
E-mail: dimantg85@rambler.ru

Maksim O. Zolotykh, Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer of Laboratory of Pyrometallurgy of Reduction Processes, Institute of Metallurgy named after Academician N.A. Vatolin, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-8923-9872
E-mail: max@zolotykh.su

Galina Yu. Vit'kina, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Head of the Laboratory of Pyrometallurgy of Reduction Processes, Institute of Metallurgy named after Academician N.A. Vatolin, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-1076-2709
E-mail: 20procents@mail.ru

Вклад авторов

А. Н. Дмитриев – формирование идеи статьи, научное руководство, разработка методологии исследования, рецензирование и редактирование рукописи.
Д. А. Витькин – проведение расчетов, анализ, обработка данных и их обсуждение, написание алгоритма расчета, визуализация результатов.
М. О. Золотых – написание алгоритма расчета.
Г. Ю. Витькина – концептуализация, подготовка обзора и редактирование текста, анализ и обработка данных, написание окончательного варианта рукописи.

Contribution of the Authors

A. N. Dmitriev – formation of the article idea, scientific guidance, development of the research methodology, review and editing of the manuscript.
D. A. Vit'kin – performing calculations, analysis, data processing and discussion, writing the calculation algorithm, visualizing the results.
M. O. Zolotykh – writing the calculation algorithm.
G. Yu. Vit'kina – conceptualization, review preparation, text editing, data analysis and processing, writing the final manuscript.

Поступила в редакцию 21.03.2025
 После доработки 27.05.2025
 Принята к публикации 11.06.2025

Received 21.03.2025
 Revised 27.05.2025
 Accepted 11.06.2025



УДК 621.771

DOI 10.17073/0368-0797-2025-4-417-423



Оригинальная статья
Original article

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПЛОСКОСТНОСТИ СТАЛЬНЫХ ХОЛОДНОКАТАНЫХ ПОЛОС

Д. Л. Шалаевский

Череповецкий государственный университет (Россия, 162600, Вологодская обл., Череповец, пр. Луначарского, 5)

shal-dmitrij@yandex.ru

Аннотация. Известной причиной возникновения дефектов плоской формы на готовых стальных холоднокатаных полосах является неравенство коэффициентов вытяжки по ширине полосы. На разницу значений этих коэффициентов оказывают влияние параметры профилировок бочек валков, энергосиловые параметры прокатки, параметры работы системы автоматического регулирования профиля и формы полосы. Воздействие всех технологических факторов на форму полосы будет иметь сложный характер. В работе рассмотрен подход, учитывающий основные параметры работы прокатного оборудования и позволяющий оценить вид и амплитуду дефектов плоскостности готовых стальных полос. При реализации такого подхода выполнены шесть этапов расчета: энергосиловой расчет процесса холодной прокатки; расчет упругих деформаций поверхности бочки рабочего валка; оценка износа поверхности бочки рабочего валка; расчет теплового профиля валка; оценка выпуклости поперечного профиля стальной полосы; оценка показателей планшетности готовой полосы. Для вычисления параметров, влияющих на планшетность проката, использованы известные методики расчета, адаптированные под конкретные технологические условия. Результаты оценки показателей формы катаной полосы, полученные с помощью модели, сопоставлены с результатами моделирования в программе Deform 3D. Результаты моделирования продемонстрировали достоверность предложенного подхода оценки качества проката.

Ключевые слова: плоскостность холоднокатаных стальных полос, непрерывная прокатка, режим прокатки, дефекты формы, профилировка бочки валка, упругая деформация бочки валка, тепловой профиль бочки валка, амплитуда дефекта

Для цитирования: Шалаевский Д.Л. Методика расчета плоскостности стальных холоднокатаных полос. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(4):417–423. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-417-423>

METHODOLOGY FOR CALCULATING THE FLATNESS OF COLD-ROLLED STEEL STRIPS

D. L. Shalaevskii

Cherepovets State University (5 Lunacharskogo Ave., Cherepovets, Vologda Region 162600, Russian Federation)

shal-dmitrij@yandex.ru

Abstract. A known cause of flat shape defects in finished cold-rolled steel strips is the inequality of the drawing ratios across the strip width. Difference in the values of these ratios is affected by the roll barrel profiling parameters, energy-power parameters of rolling, operating parameters of the automatic profile and strip shape control system. The impact of all technological factors on the strip shape is complex. The paper considers an approach that takes into account the main operating parameters of rolling equipment allowing to estimate the type and amplitude of flatness defects in finished steel strips. When implementing this approach, 6 calculation stages were performed: energy-power calculation of the cold rolling process; calculation of elastic deformations of the working roll barrel surface; assessment of wear of the working roll barrel surface; calculation of the roll thermal profile; assessment of convexity of the steel strip transverse profile; assessment of flatness indicators of the finished strip. To calculate the parameters affecting the flatness of the rolled product, known calculation methods adapted to specific process conditions were used. The results of assessing the shape indicators of the rolled strip obtained using the model were compared with the results of modeling in the Deform 3D program. The modeling results demonstrated reliability of the proposed approach to assessing the rolled product quality.

Keywords: flatness of cold-rolled steel strips, continuous rolling, rolling mode, shape defects, roll barrel profiling, elastic deformation of roll barrel, thermal profile of roll barrel, defect amplitude

For citation: Shalaevskii D.L. Methodology for calculating the flatness of cold-rolled steel strips. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(4):417–423. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-417-423>

ВВЕДЕНИЕ

Основные причины потери стальной катаной полосой плоской формы – неравномерная ее деформация по ширине, а также малая жесткость ее сечения. Последний фактор неплоскостности относится к характеристикам плоского проката.

Подавляющее количество авторов известных трудов в качестве основного критерия потери плоской формы использует разность коэффициентов вытяжки по ширине полосы. При этом отдельные влияющие параметры считаются более значимыми, другие – менее значимыми [1 – 18].

В работах [2 – 4] приведены критерии прокатки плоской полосы на основе только лишь значений коэффициентов вытяжки по ширине полосы. Результаты исследований, представленные в публикациях [5 – 8], демонстрируют возможность оценки дефекта плоскостности полосы по характеристикам ее сечения.

Модели, основанные на учете комплекса технологических параметров при оценке планшетности полосы, приведены в трудах [9 – 11].

В работах [12 – 14] представлены подходы, при реализации которых идентификация дефектов плоской формы осуществляется по характеристикам поперечного профиля проката.

Модели, ставящие в основу причин потери плоскостности полосы технологию ее охлаждения после прокатки, приведены в трудах [15 – 18].

Методика оценки планшетности, упомянутая в работе [9], позволяет выполнять расчет амплитуды неплоскостности по параметрам процесса прокатки. Эта методика учитывает практически все влияющие факторы, например, такие, как профилировка бочки рабочих валков, ее возможный износ, перекос осей рабочих валков и ряд других значимых факторов.

В рамках исследования ставилась задача разработки методики оценки амплитуды волнистости и коробоватости холоднокатаной полосы на основе разности коэффициентов вытяжки по ширине, ее дальнейшая апробация путем сравнения результатов расчета и моделирования в программе Deform 3D.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Расчет амплитуды «волны» или «короба», исходя из разности коэффициентов вытяжки полосы по ее ширине, требует данных об упругих деформациях рабочих и опорных валков, износе поверхности их бочек, а также сведения о неравномерности их тепловых расширений на ширине прокатываемой полосы.

В работе [19] представлена регрессионная зависимость упругих деформаций клетки «кварто» по длине бочки рабочего валка, полученная путем моделирования численным методом упругих деформаций валковой системы «кварто». Предложенная зависимость ранее

была применена в модели формирования плоскостности горячекатаных полос на непрерывном широкополосном стане и может быть использована в рамках вновь предлагаемой комплексной методики.

Также известны работы, которые позволяют оценить износ поверхности бочек и их неравномерное тепловое расширение по длине валка [20 – 22].

Оценка вида и амплитуды дефекта плоскостности стальной катаной полосы может быть выполнена по методике, представленной в работе [23].

Достоверность полученных таким образом результатов могла бы быть проверена путем оценки показателей качества формы плоского проката в программе Deform.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Порядок расчета вида и амплитуды дефекта плоской формы холоднокатаной полосы включал в себя следующие этапы:

- первый этап – энергосиловой расчет процесса холодной прокатки;
- второй этап – расчет упругих деформаций поверхности бочки рабочего валка;
- третий этап – оценка износа поверхности бочки рабочего валка;
- четвертый этап – расчет теплового профиля валка;
- пятый этап – оценка выпуклости поперечного профиля стальной полосы;
- шестой этап – оценка показателей планшетности готовой полосы.

Первый этап реализован с использованием модели энергосиловых параметров, учитывающей участки упругого деформирования по длине очага деформации [24 – 25].

Второй этап выполнен путем моделирования упругих деформаций валковой системы клетки «кварто» с помощью программы, использующей численные методы при исследовании механики процессов.

Для определения деформации поверхности бочки рабочего валка с учетом упругого сплющивания в зонах ее контакта с бочкой опорного валка и полосы при прокатке были созданы трехмерные компьютерные модели комплектов рабочих и опорных валков клетки пятиклетевого непрерывного стана холодной прокатки 1700.

Комплект валков был импортирован в модуль Mechanical Structure программы Ansys R1 (рис. 1).

В препроцессоре данного модуля была сгенерирована сетка (рис. 1), в качестве материала валков в интеграторе Ansys Workbench задана высокоуглеродистая сталь с пределом текучести 900 МПа. Для имитации опор в качестве граничных условий для шеек опорного валка были наложены ограничения по перемещению в направлении осей X , Y и Z (вертикальное направление), а для имитации опор рабочего валка введены ограничения на перемещение вдоль осей X , Y . В вер-

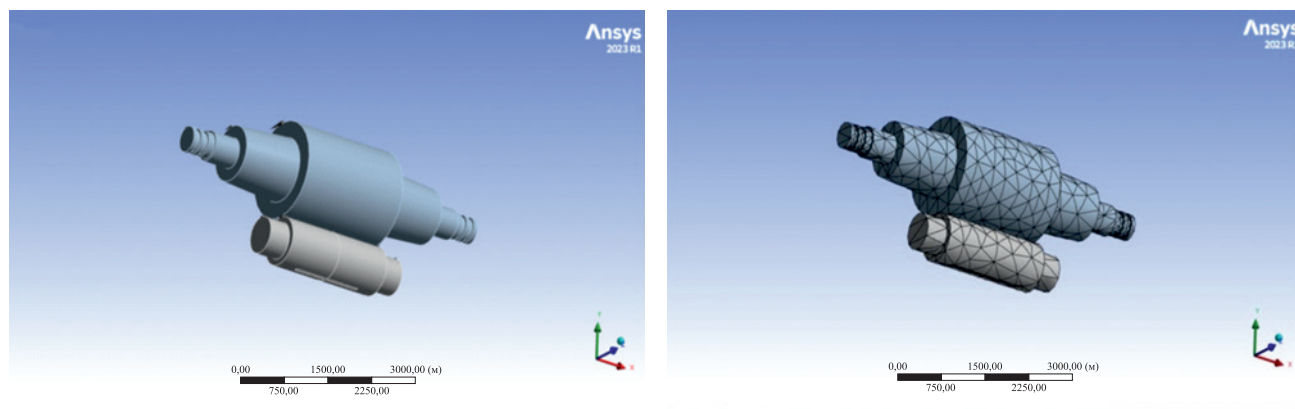


Рис. 1. Модель валковой системы клетки «кварто»

Fig. 1. Model of the roll system of “quarto” stand

тикальном направлении рабочий валок опирается на бочку опорного.

Заранее при создании твердотельной модели на поверхности бочки рабочего валка определили область, по которой будет распределено контактное давление в очаге деформации и в этой области приложили давление, равное нормальному напряжению в очаге деформации. Для этого предварительно был запущен решатель StaticStructure.

Для имитации усилия противоизгиба на торцы шеек рабочих валков приложили сосредоточенные силы, направленные вертикально по направлению оси Y .

Профилировку бочек рабочего и опорного валков, контактное давление в очаге деформации, ширину прокатываемой полосы и усилие противоизгиба рабочих

валков изменяли при моделировании в установленном диапазоне.

Цветовая диаграмма, демонстрирующая результат расчета упругих деформаций, представлена на рис. 2.

Результаты расчета разности упругих деформаций поверхности бочки рабочего валка у кромки полосы и в ее середине (упругий прогиб по ширине полосы) были обобщены в виде регрессионного уравнения

$$\Delta_{\text{дс}} - \Delta_{\text{дкр}} = 0,00001632 \cdot 10^{-5} b + 0,007703 P - 0,00000305 P_{\text{изг}} - 0,0200 \Delta D_{\text{ш.с.}} - 0,0169 \Delta D_{\text{ш.с.оп}}, \quad (1)$$

где P – сила прокатки в i -ой клетки, МН; $P_{\text{изг}}$ – сила противоизгиба рабочих валков, кН; b – ширина полосы, мм; $\Delta D_{\text{ш.с.}}$ – шлифовочная выпуклость бочки рабочего

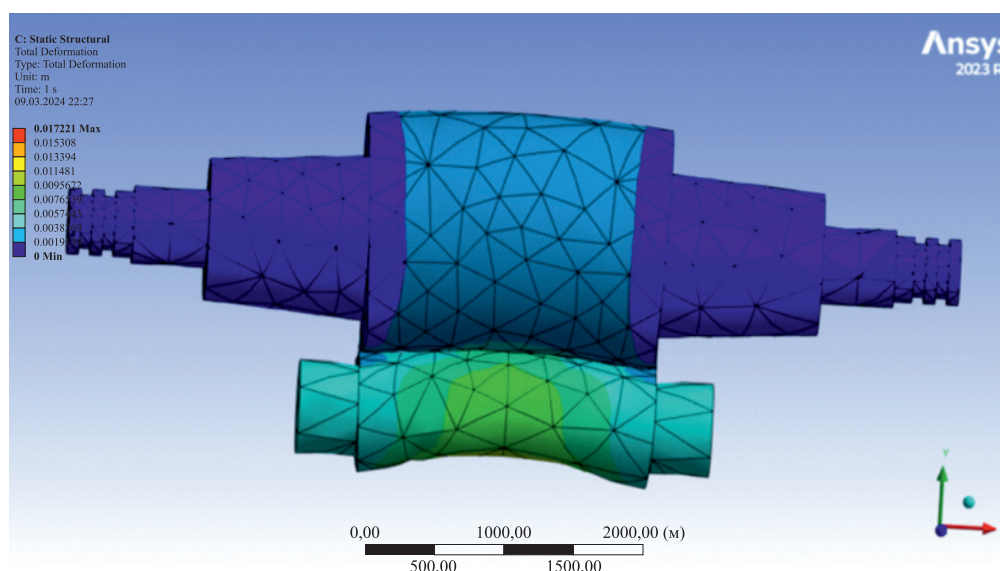


Рис. 2. Пример результата расчета упругих деформаций в вертикальной осевой плоскости валков клетки «кварто» в модуле MechanicalStructure программы Ansys R1

Fig. 2. Example of the result of calculating elastic deformations in vertical axial plane of the rolls of “quarto” stand in the MechanicalStructure module of the Ansys R1 program

Таблица 1. Результаты проверки значимости коэффициентов уравнения для расчета упругих деформаций

Table 1. Results of checking the significance of coefficients of the equation for calculating elastic deformations

Наименование параметра	Уровень статистической значимости результатов (p -value)
Ширина полосы, мм	0,01
Сила прокатки в i -ой клетки, МН	$2,07 \cdot 10^{-30}$
Сила противоизгиба рабочих валков, кН	$4,31 \cdot 10^{-9}$
Шлифовочная выпуклость бочки рабочего валка в ее середине, мм	0,02
Шлифовочная выпуклость бочки опорного валка в ее середине, мм	$4,36 \cdot 10^{-8}$
Примечание. Параметр является статистически значимым, если величина p -value менее 0,05.	

валка в ее середине, мм; $\Delta D_{\text{ш.с.оп}}$ – шлифовочная выпуклость бочки опорного валка в ее середине, мм.

Коэффициент множественной детерминации R^2 составил 0,86, что показывает высокую достоверность полученной зависимости.

Значимость коэффициентов в уравнении (1) оценили с помощью уровня статистической значимости (p -value), используя набор данных из результатов сорока вариантов моделирования, ранее представленных в работе [19]. Результаты проверки приведены в табл. 1.

Третий этап – оценка износа поверхности бочки рабочего валка выполнена на основе экспериментальных данных, содержащих параметры работы валка, данные о твердости его поверхности и профилировки [20].

Данные табл. 2 демонстрируют, что на износ влияют усилие прокатки, твердость поверхности бочки валка, диаметр его бочки и количество прокатанной на нем стальной полосы. Исходная вогнутость оказывает несущественное воздействие.

Определена зависимость износа бочки валка в ее середине и у кромок полосы от установленных влияющих факторов:

$$\Delta_c = k_p P + k_L L_m, \quad (2)$$

где P – средний уровень усилия прокатки в рабочей клетки с момента завалки рабочего валка в клеть, МН; L_m – длина полосы, прокатанной на рабочих валках в клетки м; k_p – коэффициент влияния усилия прокатки

на износ поверхности бочки рабочего валка; k_L – коэффициент влияния длины полосы, прокатанной на рабочих валках в клетки.

Значение этих коэффициентов, например, для середины бочки валка, определены уравнением (в середине ширины полосы)

$$k_p = -0,00025HSD + 0,0000285D, \quad (3)$$

где HSD – твердость поверхности бочки валка по шкале Шора, D – диаметр бочки рабочего валка, мм (значение коэффициента множественной детерминации уравнения составил $R^2 = 0,89$);

$$k_L = -0,0000011HSD + 0,00000011D. \quad (4)$$

Четвертый этап – расчет теплового профиля бочки валка.

Расчет теплового режима непрерывного стана холодной прокатки производится путем составления и совместного решения уравнений теплового баланса рабочих и опорных валков, а также полосы. Использование такой модели для процессов непрерывной холодной и горячей прокатки стальной полосы представлено в уже упомянутых работах [21; 22].

Тепловая выпуклость бочки валка по ширине полосы рассчитывается с учетом найденной из системы уравнений температуры бочки валка в ее середине.

Пятый этап – оценка профиля полосы, может быть выполнена с учетом найденных на предыдущих

Таблица 2. Результаты оценки коэффициентов корреляции Пирсона параметров валков и технологии с величиной износа поверхности бочки

Table 2. Results of assessing the Pearson correlation coefficients of the rolls parameters and technology with amount of the barrel surface wear

Наименование параметра	Усилие прокатки, МН	Твердость бочки валка, HSD	Диаметр валка, мм	Наработка валка, м	Исходная вогнутость поверхности бочки валка в ее середине, мм
Величина коэффициента	–0,4755	0,4277	–0,4055	0,4839	0,012

этапах расчета компонент, определяющих форму сечения готового плоского проката на выходе из валков:

- исходная шлифовочная профилировка с учетом ее текущего износа, $\Delta_{шy}$;
- упругая деформация поверхности бочки вала, $\Delta_{дy}$;
- тепловой профиль (тепловая выпуклость) поверхности бочки вала, $\Delta_{тy}$;
- номинальная толщина полосы, h_i .

Толщина полосы в произвольной точке по ее ширине с координатой y составит:

$$\Delta_{iy} = h_i - \Delta_{шy} + \Delta_{дy} - \Delta_{тy}.$$

Шестой этап – оценка показателей планшетности готовой полосы, может быть реализована с применением зависимостей, представленных в работе [23].

Зная толщины подката и проката по их ширине и, следовательно, коэффициенты вытяжки у кромок полосы и в ее середине, возможно оценить наиболее важный параметр дефекта планшетности по ГОСТ 19903 – 2015 – амплитуду дефекта плоскостности:

- «волна», образовавшаяся в i -ой клетке непрерывной группы клетей:

$$a_{bi} = \frac{hE \left[1 - \cos \left(\frac{2\sigma_k (\lambda_{кр} - \lambda_c)}{hE} \right) \right]}{\sigma_k}, \quad (5)$$

где h – толщина полосы, E – модуль упругости полосы, σ_k – критическое напряжение потери устойчивости, $\lambda_{кр}$, λ_c – коэффициенты вытяжки у кромки полосы и в середине ее ширины, определяемые, исходя из формы сечения подката и полосы на выходе из валков;

- «короб», образовавшийся в i -ой клетке непрерывной группы клетей:

$$a_{ki} = \frac{hE \left[1 - \cos \left(\frac{2\sigma_k (\lambda_c - \lambda_{кр})}{hE} \right) \right]}{\sigma_k}. \quad (6)$$

При этом подтверждено [23], что дефект планшетности полосы будет «накапливаться» на полосе от клетки к клетке. Тогда, если тот же вид дефекта планшетности проявится в последующих клетях, то амплитуды его будут суммироваться.

Оценку достоверности расчета вида и амплитуды волны по формулам (4) и (5) выполнили путем моделирования процесса прокатки в программе Deform 3D. Для этого создали бочки валков с продольным профилем, учитывающим упругую деформацию и тепловую выпуклость бочки на ширине полосы. Также возможно учесть неравномерный износ поверхности бочки. Создали подкат с заданным профилем поперечного сечения и промоделировали технологический процесс. В постпроцессоре оценили путем отслеживания точек по ширине полос разность перемещений в вертикальном направлении середины и кромки полосы.

На рис. 3 линия 3 показывает перемещение в вертикальном направлении точки полосы у ее кромки, линия 1 – в середине ширины полосы. Разницу в перемещении в вертикальном направлении кромки полосы и середины ее ширины принимали за амплитуду дефекта.

Пример оценки амплитуды в программе Deform 3D представлен на рис. 4.

Результаты оценки достоверности аналитической методики с использованием данных, полученных в программе Deform 3D, демонстрируют достаточную достоверность модели для применения ее при прогнозировании плоскостности холоднокатаной полосы.

Выводы

Известной причиной возникновения дефектов плоской формы на готовых стальных холоднокатаных поло-

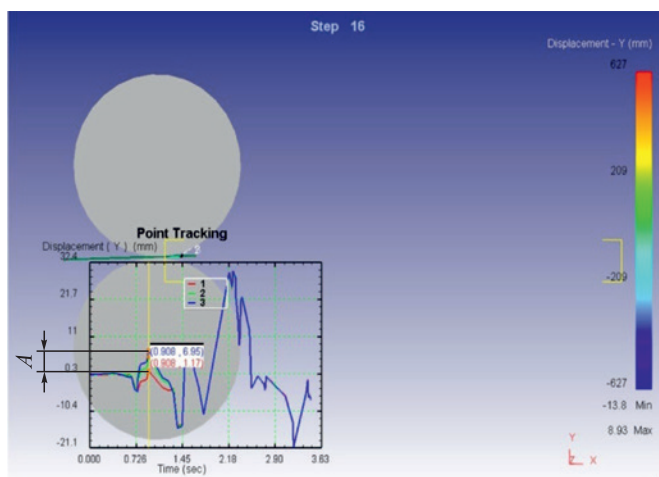


Рис. 3. Пример оценки дефекта плоскостности полосы «волна» (A – амплитуда «волны» на полосе)

Fig. 3. Example of assessing flatness defect of the “wave” strip (A – amplitude of “wave” on the strip)

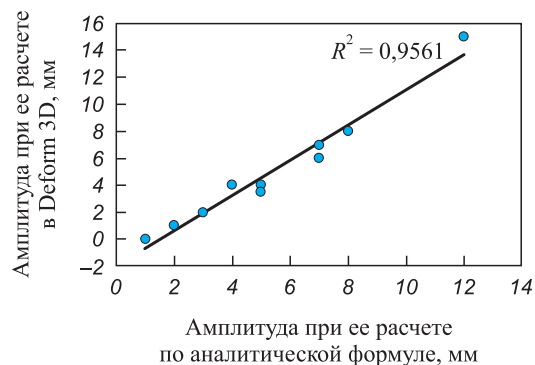


Рис. 4. Сравнение результатов расчета амплитуды неплоскостности

Fig. 4. Comparison of the results of calculating the non-flatness amplitude

сах является неравенство коэффициентов вытяжки по ширине полосы. На разницу значений этих коэффициентов оказывают влияние параметры профилировок бочек валков, энергосиловые параметры прокатки, параметры работы системы автоматического регулирования профиля и формы полосы. Воздействие всех технологических факторов на форму полосы будет иметь сложный характер. В работе рассмотрен подход, учитывающий основные параметры работы прокатного оборудования, позволяющий оценить вид и амплитуду дефектов плоскостности готовых стальных полос.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Shalaevskii D.L. Models for the formation of flatness defects of steel strip during its rolling and heat treatment. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2024;2024(7):1760–1764. <https://doi.org/10.1134/S0036029524703063>
2. Будакова А.А., Коновалов Ю.В., Ткалич К.Н. Профилирование валков листовых станов. Киев: Техника; 1986:190.
3. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л., Босхамджиев Н.Ш. Производство планшетных полос при прокатке. Москва: Теплотехник; 2008:355.
4. Шаталов Р.Л., Максимов Е.А., Верхов Е.Ю. Рациональные режимы управления плоскостностью полос при тонколистовой реверсивной прокатке / *Научно-технический прогресс в черной металлургии: Материалы II Международной научно-технической конференции (7 – 9 октября 2015 г.)*. Череповец: Череповецкий государственный университет; 2015:148–151.
5. Шаталов Р.Л., Максимов Е.А. Уточнение метода расчета критических напряжений и показателей плоскостности полосы при тонколистовой прокатке. *Сталь*. 2016; (4):26–30.
Shatalov R.L., Maksimov E.A. Clarification of the method for calculating critical stresses and flatness indices of strip during thin-sheet rolling. *Stal'*. 2016;(4):26–30. (In Russ.).
6. Иевлев Н.Г. Математические модели плоскостности толстолистного проката применительно к АСУ ТП. *Математичні машини і системи*. 2018;(1):67–77.
Ievlev N.G. Mathematical models of flatness of thick sheet metal applied to automated process control systems. *Matematichni mashini i sistemi*. 2018;(1):67–77. (In Russ.).
7. Шаталов Р.Л., Максимов Е.А. Анализ эффективности технологии асимметричной прокатки для повышения точности прокатываемых полос. *Металлург*. 2016;(7):80–84.
Shatalov R.L., Maksimov E.A. Analysis of asymmetric rolling efficiency for increasing accuracy of rolled strips. *Metallurg*. 2016;(7):80–84. (In Russ.).
8. Бартхольдт Х., Копин Ф., Джелали М. Универсальная модель плоскостности для оптимизации процесса холодной прокатки. *Черные металлы*. 2015;(3):53–58.
Bartkholt'dt Kh., Kopin F., Dzhelali M. Universal flatness model for process optimization in cold rolling mills. *Chernye metally*. 2015;(3):53–58. (In Russ.).
9. Шалаевский Д.Л., Митрофанов А.В., Корепина К.П. Повышение плоскостности готовых стальных полос на энергосберегающих режимах непрерывной горячей прокатки. *Сталь*. 2022;(2):15–17.
Shalaevskii D.L., Mitrofanov A.V., Korepina K.P. Improvement in the flatness of finished steel strips under energy saving regimes of continuous hot rolling. *Stal'*. 2022;(2):15–17. (In Russ.).
10. Гарбер Э.А., Шалаевский Д.Л., Мишнев П.А., Михеева И.А., Палигин Р.Б. Улучшение плоскостности горячекатаных стальных широких полос путем оптимизации настройки параметров технологического режима / *Всероссийская научно-практическая конференции «Проблемы черной металлургии – 2015. Международный научный семинар»*. 2016:76–82.
11. Григорян Г.Г., Железнов Ю.Д., Черный В.А. и др. Настройка, стабилизация и контроль процесса тонколистовой прокатки. Москва: Металлургия; 1983:120.
12. Пименов В.А., Бельский С.М., Кузнецова Е.В., Шкарин А.Н. Математическая модель идентификации формы профиля поперечного сечения горячекатаных полос и распределения вытяжек по ширине холоднокатаных полос. Сообщение 1. *Производство проката*. 2018;(1):11–15.
Pimenov V.A., Bel'skii S.M., Kuznetsova E.V., Shkarin A.N. Mathematical model for identifying the shape of profile with primary cross-section of hot-rolled strips and distribution of extensions across the width of cold-rolled strips. Report 1. *Proizvodstvo prokata*. 2018;(1):11–15. (In Russ.).
13. Пименов В.А., Бельский С.М., Кузнецова Е.В., Шкарин А.Н. Математическая модель идентификации формы профиля поперечного сечения горячекатаных полос и распределения вытяжек по ширине холоднокатаных полос. Сообщение 2. *Производство проката*. 2018;(6):9–14.
Pimenov V.A., Bel'skii S.M., Kuznetsova E.V., Shkarin A.N. Mathematical model for identifying the shape of profile with primary cross-section of hot-rolled strips and distribution of extensions across the width of cold-rolled strips. Report 2. *Proizvodstvo prokata*. 2018;(6):9–14. (In Russ.).
14. Шкарин А.Н. Формирование плоскостности холоднокатаных полос с учетом особенностей профиля поперечного сечения горячекатаного подката: Автореферат диссертации ... кандидата технических наук. 2021.
15. Wang X., Yang Q., He A. Calculation of thermal stress affecting strip flatness change during run-out table cooling in hot steel strip rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008;207(1-3):130–146. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.076>
16. Hrabovsky J., Pohanka M., Lee P.J., Kang J.H. Experimental and numerical study of hot-steel-plate flatness. *Materials and Technology*. 2016;50(1):17–21. <https://doi.org/10.17222/mit.2014.153>
17. Wu H., Sun J., Lu X., Peng W. Predicting stress and flatness in hot-rolled strips during run-out table cooling. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022;84:815–831. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.053>
18. Божков А.И., Ковалев Д.А., Черников О.В., Юсупов В.С., Ивлиев С.Н., Дегтев С.С. Влияние режимов термообработки на плоскостность полос электротехнических изотропных сталей. Сообщение 2. *Сталь*. 2019;(2):26–28.
Bozhkov A.I., Kovalev D.A., Chernikov O.V., Yusupov V.S., Ivliev S.N., Degtev S.S. Influence of heat treatment on the planarity of isotropic electrical steel strip. Part 2. *Steel in Translation*. 2019;49(2):131–133. <https://doi.org/10.3103/S0967091219020049>

19. Шалаевский Д.Л. Прогнозирование плоскостности стальной полосы на основе разности коэффициентов вытяжек по ее ширине при прокатке. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2024;80(10):20–27.
Shalaevskii D.L. Prediction of steel strip flatness based on the difference in drawing coefficients along its width during steel strip rolling. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2024;80(10): 20–27. (In Russ.).
20. Шалаевский Д.Л., Сидоров А.В. Исследование износа поверхности бочек рабочих валков непрерывной группы клеток широкополосного стана горячей прокатки. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2024;22(7):315–318.
<https://doi.org/10.36652/1684-1107-2024-22-7-315-318>
Shalaevskiy D.L., Sidorov A.V. Study of wear on surface of work rolls barrels of continuous stands of a wide strip hot rolling mill. *Zagotovitel'nyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2024;22(7):315–318. (In Russ.).
<https://doi.org/10.36652/1684-1107-2024-22-7-315-318>
21. Гарбер Э.А. Станы холодной прокатки: (теория, оборудование, технология). Москва: ОАО “Черметинформация”; 2004:412.
22. Шалаевский Д.Л. Исследование теплового режима рабочих валков стана горячей прокатки с целью повышения точности расчета температур поверхностей их бочек. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2023; 66(3):283–289.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-3-283-289>
Shalaevskii D.L. Investigation of thermal mode of hot-rolling mill working rolls in order to improve the accuracy of calculating the thermal profile of their barrels' surface. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(3):283–289.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-3-283-289>
23. Шалаевский Д.Л. Исследование влияния технологических факторов при непрерывной горячей прокатке на плоскостность тонких стальных листов с целью повышения их качества. *Металлы*. 2024;(5):62–68.
<https://doi.org/10.31857/S0869573324056268>
Shalaevskii D.L. Investigation of the influence of technological factors on continuous high-speed rolling on flatness of thin steel sheets with the aim of increasing their quality. *Metally*. 2024;(5):62–68. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S0869573324056268>
24. Shalaevskiy D.L., Kozhevnikov A.V. Algorithm and design methodology for energy-efficient sheet products production technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;718:012015.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/718/1/012015>
25. Garber E.A., Shalaevskii D.L., Kozhevnikova I.A., Traino A.I. Procedure and algorithms for the energy-force calculation of cold rolling allowing for the number of neutral sections in the deformation zone. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2008;2008(4):315–325.
<https://doi.org/10.1134/S0036029508040083>

Сведения об авторе

Information about the Author

Дмитрий Леонидович Шалаевский, к.т.н., доцент кафедры металлургии, машиностроения и технологического оборудования, Череповецкий государственный университет

ORCID: 0000-0002-0443-4135

E-mail: shal-dmitrij@yandex.ru

Dmitrii L. Shalaevskii, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Metallurgy, Mechanical Engineering and Technological Equipment”, Cherepovets State University

ORCID: 0000-0002-0443-4135

E-mail: shal-dmitrij@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.04.2025

После доработки 19.06.2025

Принята к публикации 20.06.2025

Received 25.04.2025

Revised 19.06.2025

Accepted 20.06.2025

В ПОРЯДКЕ ДИСКУССИИ

IN THE ORDER OF DISCUSSION



УДК 669.11:669.292.34

DOI 10.17073/0368-0797-2025-4-424-433



Оригинальная статья

Original article

ЭЛЕКТРОХИМИЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В. Е. Рощин[✉], А. В. Рощин

Южно-Уральский государственный университет (Россия, 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76)

[✉ roshchinve@susu.ru](mailto:roshchinve@susu.ru)

Аннотация. Окисление и восстановление металлов заключаются в потере атомами металлов валентных электронов с преобразованием электромагнитной металлической связи в ионную при окислении и обратный переход электронов от анионов к катионам металла с превращением ионной связи в металлическую при восстановлении. Развиваемая авторами электронная теория восстановления описывает процесс восстановления последовательной работой двух электрохимических элементов: топливного, в котором химическая энергия окисляемого восстановителя превращается в электрическую энергию «свободных» электронов, и твердоэлектролитного электролизера, превращающего электрическую энергию этих электронов в энергию металлической связи восстанавливаемых катионов в оксиде. Так как стадией собственно восстановления является образование металлической связи между катионами за счет поступающих извне электронов, то самым коротким и потому самым эффективным будет подвод электронов к восстанавливаемым катионам не от топливного элемента, а из электрической сети, то есть электролиз оксидов восстанавливаемого металла. Известные способы получения железа электролизом расплавленных оксидов, а также, возможно, щелочных растворов являются перспективными при извлечении железа из богатых руд. Для селективного извлечения железа из железомарганцевых, титаномагнетитовых, сидеритовых, хромитовых и других комплексных руд более перспективным является относительно низкотемпературное восстановление железа водородом или твердофазный электролиз с получением после разделения продукта металлизации плавлением безуглеродистого железа и концентрата оксидов активных металлов.

Ключевые слова: электрохимия окислительно-восстановительных процессов, электронная теория восстановления, электрохимический топливный элемент, углеродное селективное восстановление, водородное восстановление, электролиз

Для цитирования: Рощин В.Е., Рощин А.В. Электрохимия восстановительных процессов и перспективы развития восстановительных технологий. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(4):424–433. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-424-433>

ELECTROCHEMISTRY OF REDUCTION PROCESSES AND PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF REDUCTION TECHNOLOGIES

V. E. Roshchin[✉], A. V. Roshchin

South Ural State University (76 Lenina Ave., Chelyabinsk 454080, Russian Federation)

[✉ roshchinve@susu.ru](mailto:roshchinve@susu.ru)

Abstract. Oxidation and reduction of metals consist in the loss of valence electrons by metal atoms with the conversion of an electromagnetic metallic bond into an ionic bond during oxidation and the reverse transition of electrons from anions to metal cations with the conversion of an ionic bond into a metallic bond during reduction. The electronic reduction theory developed by the authors describes the reduction process by the sequential operation of two electrochemical cells: a fuel cell, in which the chemical energy of the oxidized reducing agent is converted into electrical energy of “free” electrons, and a solid electrolyte electrolyzer, which converts the electrical energy of these electrons into energy of the metal bond of the reduced cations in the oxide. Since the stage of the actual reduction is the formation of a metallic bond between cations due to electrons coming from outside, the shortest and therefore most effective supply of electrons to the reduced cations will be not from the fuel cell, but from the electrical network, that is, electrolysis of the oxides of the metal being reduced. Known methods for producing iron by electrolysis of molten oxides, as well as possibly alkaline solutions, are promising for extracting iron from rich ores. For the selective extraction of iron from ferromanganese, titanomagnetite, siderite, chromite and other complex ores, relatively low-temperature reduction of iron with hydrogen or solid-phase electrolysis to produce, after separation, a metallization product by melting carbon-free iron and a concentrate of active metal oxides is more promising.

Keywords: electrochemistry of reduction processes, electronic theory of reduction, electrochemical fuel cell, carbon selective reduction, hydrogen reduction, electrolysis

For citation: Roshchin V.E., Roshchin A.V. Electrochemistry of reduction processes and prospects for the development of reduction technologies. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(4):424–433. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-424-433>

ВВЕДЕНИЕ

Существующие в настоящее время способы восстановления и извлечения металлов из руд зародились задолго до появления науки и сложились в результате совершенствования ремесла получения металлов. Более того, практика превращения руды в металл в значительной степени сама была побуждающей причиной появления науки о превращении вещества: сначала в виде алхимии, а позднее и собственно химии. Лишь в конце XIX века благодаря развитию атомно-молекулярных представлений на основе достижений науки о химических реакциях появились первые научные объяснения механизма процессов, протекающих при восстановлении металлов [1 – 3].

В настоящее время нет сомнений в том, что атомы и молекулы существуют только в газовой фазе: в конденсированных металлах нет атомов, а в оксидах руды нет молекул. И там, и там металлы находятся в виде катионов и «потерянных» атомами валентных электронов, которые тем или иным способом связывают катионы металлов электромагнитным полем в конденсированную фазу: в металлах – металлической, а в оксидах – ионной связью. Несомненно также, что суть процессов окисления и восстановления металлов заключается в перераспределении валентных электронов атомов, и эти процессы необходимо представлять реакциями потери атомами металлов валентных электронов с переходом их к атомам окислителя и изменением металлической электромагнитной связи на ионную ($Me^0 = Me^{2+} + 2e$) при окислении и возвращения этих электронов от анионов окислителя катионам с возвращением катионов к металлической связи при восстановлении ($Me^{2+} + 2e = Me^0$). Таким образом, восстановление и окисление – это электрохимические процессы, обусловленные перераспределением валентных электронов атомов металлов. Однако в металлургической науке при описании процессов восстановления металлов из руд до сих пор безраздельно господствует атомно-молекулярный подход [4; 5]. Явно устаревшее научное описание процессов восстановления на атомно-молекулярном уровне, например, $C + FeO = CO + Fe$, не способствует совершенствованию должным образом технологических процессов, приведению их в соответствие с современным уровнем науки [6 – 8].

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕОРИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Развиваемая в последние годы авторами с коллегами электронная теория восстановления [9; 10] имеет

целью описание электрохимических процессов обмена электронами между окисляемыми атомами восстановителя и катионами восстанавливаемого металла. Эта теория основана на результатах большого количества собственных специальных экспериментов и обобщении известных результатов других авторов. Теория исходит из электрохимической природы реакций восстановления, учитывает изменение структуры твердых руд (появление анионных вакансий вследствие низкого парциального давления кислорода P_{O_2} и высокой температуры $T \approx 2000$ °C) и соответствующего этим параметрам состава газовой фазы (образование низкотемпературной плазмы) при нагреве в восстановительных агрегатах, базируется на физике несовершенных кристаллов, положениях квантовой механики об особенностях распределения и перемещения электронов в металлах и ионных полупроводниках. Выводы теории охватывают все известные результаты восстановления с образованием металла на поверхности кусков богатых моноруд, выделение металла внутри комплексных и бедных руд, диссоциацию оксидов, образование и сублимацию субоксидов, а также получение металлов электролизом из жидких растворов и расплавленных солей.

Согласно теории, в условиях высоких температур и низкого парциального давления кислорода в газовой фазе восстановительных агрегатов для протекания химических реакций между твердыми оксидами руд и твердым углеродом кокса даже не требуется непосредственного контакта твердых реагентов. Плазменное состояние газовой фазы позволяет ионам и электронам, присутствующим в самой плазме и на поверхности соприкасающихся с плазмой твердых реагентов, взаимодействовать под действием электрических зарядов на расстоянии, сближаться и вступать в химические реакции в газовой фазе, что обеспечивает протекание реакций твердофазного восстановления с высокой скоростью в кинетическом режиме (рис. 1, а).

Новым и принципиально важным положением электронной теории восстановления является теоретически обоснованный и многократно подтвержденный специальными экспериментами с комплексными и бедными рудами механизм передачи электронов от восстановителя катионам восстанавливаемого металла, то есть механизм твердофазного восстановления. Он заключается в образовании и перемещении в кристаллической решетке каждого куса оксида анионных вакансий со «свободными» (не связанными конкретно с каким-либо катионом) электронами, источником которых является химическая реакция между восстановителем и кислородом оксида в газовой фазе. Низкое парциальное дав-

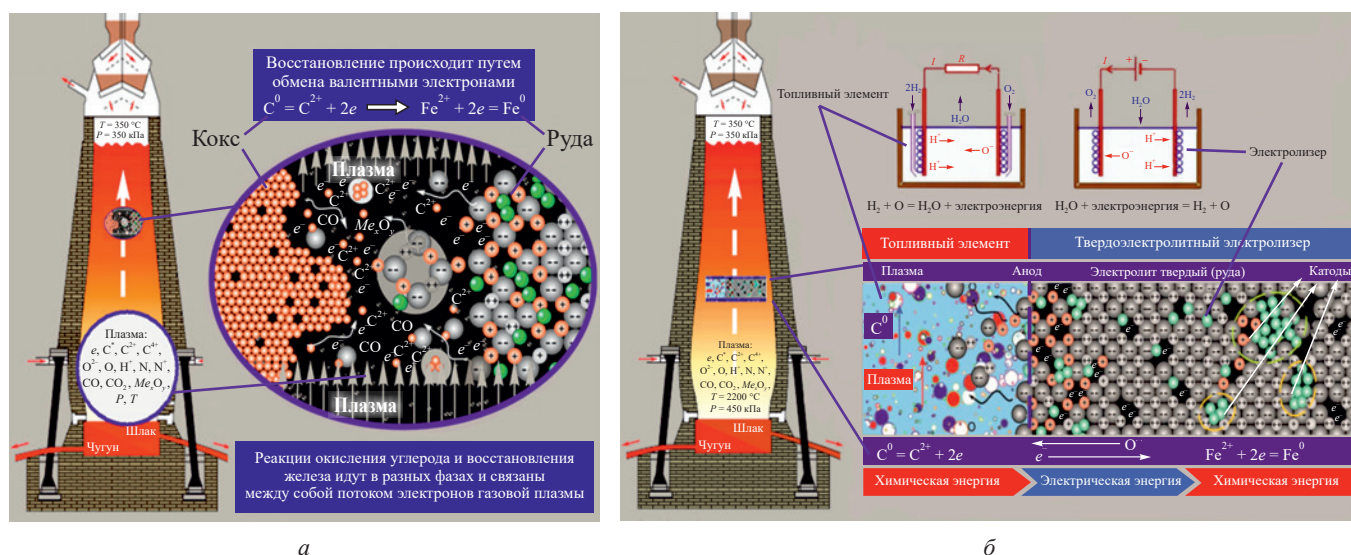


Рис. 1. Электрохимические процессы в доменной печи:

- а – образование плазмы в газовой фазе и появление анион-электронной проводимости в оксидах руды;
 б – преобразование химической энергии в электрическую в топливном элементе и обратный переход электрической энергии в химическую в твердоэлектролитном электролизере

Fig. 1. Electrochemical processes in a blast furnace:

- а – plasma formation in the gas phase and appearance of anion-electron conductivity in ore oxides;
 б – conversion of chemical energy into electrical energy in a fuel cell and reverse conversion of electrical energy into chemical energy in a solid electrolyte electrolyzer

ление кислорода в газовой фазе, обусловленное химическим взаимодействием с восстановителем, и высокая подвижность ионов кристаллической решетки оксида вследствие высокой температуры вызывают переход кислорода из оксида в газовую фазу. Покидая кристаллическую решетку оксида и принимая в газовой фазе два электрона от восстановителя, атом кислорода оставляет в решетке анионную вакансию и связанные с ней два «свободных» электрона, ранее захваченных анионом кислорода у катионов металла.

Вследствие развитого теплового движения ионов анионные вакансии и связанные с ними «свободные» электроны рассеиваются в решетке комплексных оксидов и перемещаются до встречи с катионами, обладающими высоким сродством к электрону (уровнем Ферми) [11]. В местах скопления таких катионов перемещение заряженных электронами вакансий прекращается, вакансии сливаются, а на их месте за счет поступивших с вакансией «свободных» электронов образуется металлическая связь и выделяется металлическая фаза. Таким образом, удаление атомарного кислорода с поверхности одной оксидной фазы может приводить к селективному восстановлению катионов с высоким сродством к электронам в кристаллической решетке другого оксида. Пример такого восстановления представлен на рис. 2, где показана схема проведения и результаты экспериментов по твердофазному восстановлению твердым углеродом катионов железа и хрома в кристаллах хромшпинелида $(Mg, Fe)[Fe, Al, Cr]_2O_4$, вкрапленных в оливин $(Mg, Fe)_2[SiO_4]$.

Согласованное перемещение «свободных» электронов и анионных вакансий в восстановительных условиях среды происходит без наложения внешнего электрического поля вследствие разности химических потенциалов кислорода и электронов на поверхности и в объеме оксидной фазы. «Свободные» электроны могут перемещаться также по анионным вакансиям другого (теплового или примесного) происхождения, если при этом не нарушается общее и локальное равенство положительных и отрицательных электрических зарядов.

Таким образом, восстановительный процесс в восстановительных агрегатах следует представлять как совокупность работы двух последовательных электрохимических элементов: углеродного топливного элемента, в котором химическая энергия окисляемого восстановителя превращается в электрическую энергию «свободных» электронов, и твердоэлектролитного электролизера, в котором эта электрическая энергия переместившихся с поверхности в объем оксида электронов поглощается катионами и превращается в химическую энергию металлической связи (рис. 1, б). В восстановительных агрегатах такими последовательно работающими парами электрохимических элементов (топливных элементов и электролизеров) являются газовая фаза и каждый кусок руды. Благодаря бесчисленному количеству этих электрохимических элементов (кусков руды) достигается гигантская производительность восстановительных агрегатов, в частности, доменных печей.

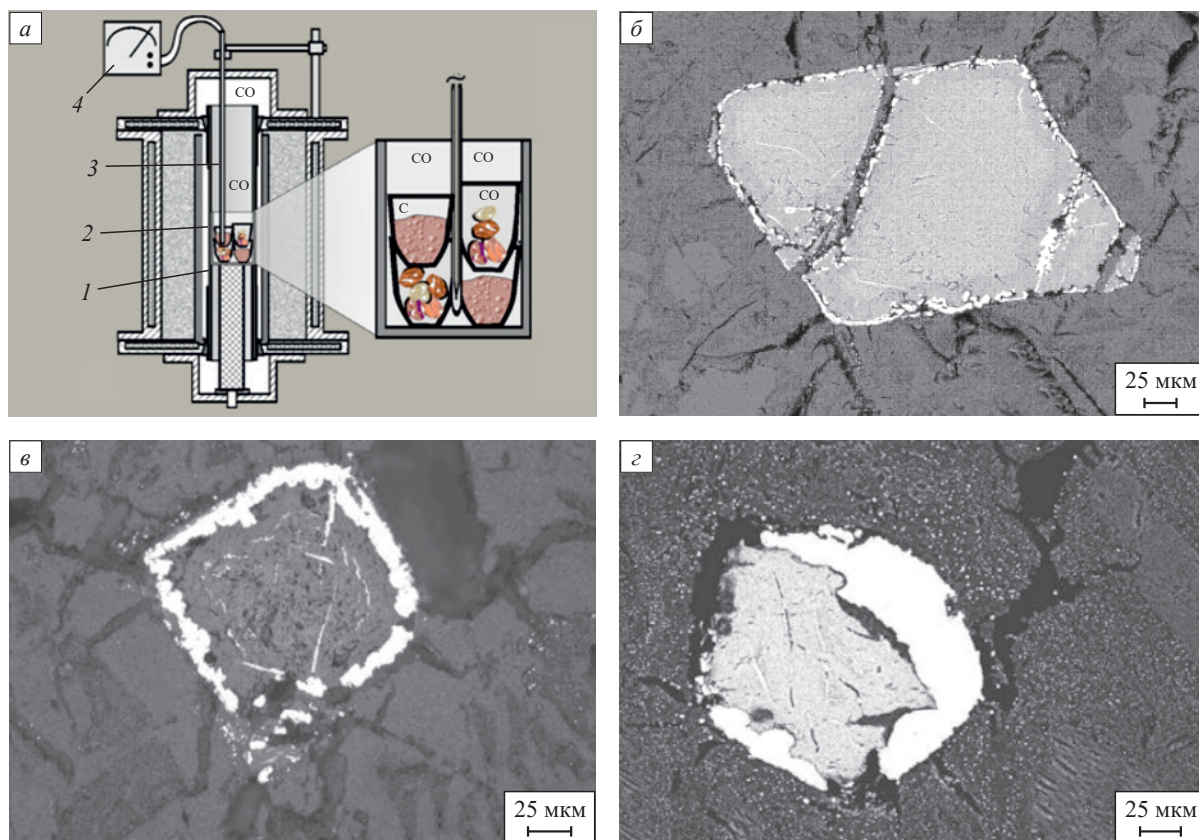


Рис. 2. Схема установки на базе печи Таммана для проведения экспериментов по твердофазному селективному восстановлению вкрапленных руд (а) и последовательные стадии (б – з) восстановления железа и хрома в кристалле хромшпинелида $(\text{Mg, Fe})[\text{Fe, Al, Cr}]_2\text{O}_4$, вкрапленном в оливин $(\text{Mg, Fe})_2[\text{SiO}_4]$: 1 – графитовый нагреватель; 2 – контейнер с тиглями; 3 – термопара; 4 – потенциометр

Fig. 2. Scheme of the installation based on the Tammann furnace for conducting experiments on solid-phase selective reduction of impregnated ores (a) and successive stages (б – з) of reduction of iron and chromium in a chromspinelite $(\text{Mg, Fe})[\text{Fe, Al, Cr}]_2\text{O}_4$ crystal impregnated in olivine $(\text{Mg, Fe})_2[\text{SiO}_4]$: 1 – graphite heater; 2 – container with crucibles; 3 – thermocouple; 4 – potentiometer

ПЕРСПЕКТИВЫ ТРАНСФОРМАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Электрохимическая природа процессов окисления/восстановления в настоящее время уже не должна быть предметом дискуссий. Следовательно, не должно вызывать сомнений и наличие в восстановительных агрегатах потока электронов между восстановителем и катионами восстанавливаемого металла, то есть протекания между ними электрического тока. Электронная теория описывает механизм появления и преобразования тока как результат последовательной работы двух электрохимических элементов: топливного преобразователя химической энергии в электрическую и электролизера. Этот механизм не противоречит практике работы восстановительных агрегатов всех типов и подтвержден многочисленными результатами специальных экспериментов с разными рудами и разными восстановителями. На основании изложенного следует сделать вывод о том, что заключительной стадией всех используемых в настоящее время технологий многостадийного про-

цесса восстановления металлов всегда является переход «свободных» электронов от атомов восстановителя к катионам восстанавливаемого металла с выделением атомарного кислорода на поверхности оксида и металла в оксидной фазе, то есть твердоэлектролитный электролиз руды.

В связи с этим возникает вопрос о необходимости многочисленных дорогостоящих предшествующих и промежуточных стадий процесса восстановления и целесообразности генерации «свободных» электронов в топливном элементе агрегатов извлечения железа из руд. Очевидно, что генерировать «свободные» электроны несравненно проще и дешевле не путем сжигания восстановителя в металлургических восстановительных агрегатах, а современными методами на электростанциях, передавать их по электрической сети и сразу использовать на последней стадии восстановления катионов в специализированном электрохимическом агрегате (в электролизере). Таким образом, существующий многостадийный и энергозатратный процесс извлечения железа из руд (рис. 3, а – в) целе-

сообразно свести к одной заключительной стадии – электролизу (рис. 3, з). В связи с этим, извлечение металлов из руд электролизом представляется конечной целью трансформации существующих металлургических технологий.

Электролиз расплавленных солей и оксидов давно используется для восстановления и производства в промышленных масштабах ряда металлов, например, алюминия [12]. Достаточно давно ведутся работы по разработке устройств и процессов извлечения путем электролиза железа из водных растворов его солей [13].

В последнее время некоторые фирмы интенсифицировали исследования по разработке устройств и процессов получения железа электролизом расплавленных оксидов [14 – 16]. Однако в целом к перспективам получения железа электролизом у практических специалистов и, что особенно важно, у научного сообщества отношение пока не только скептическое, а скорее даже негативное.

До сих пор оправданием производства чугуна с последующим переделом его в сталь является колоссальная производительность доменных печей, доступ-

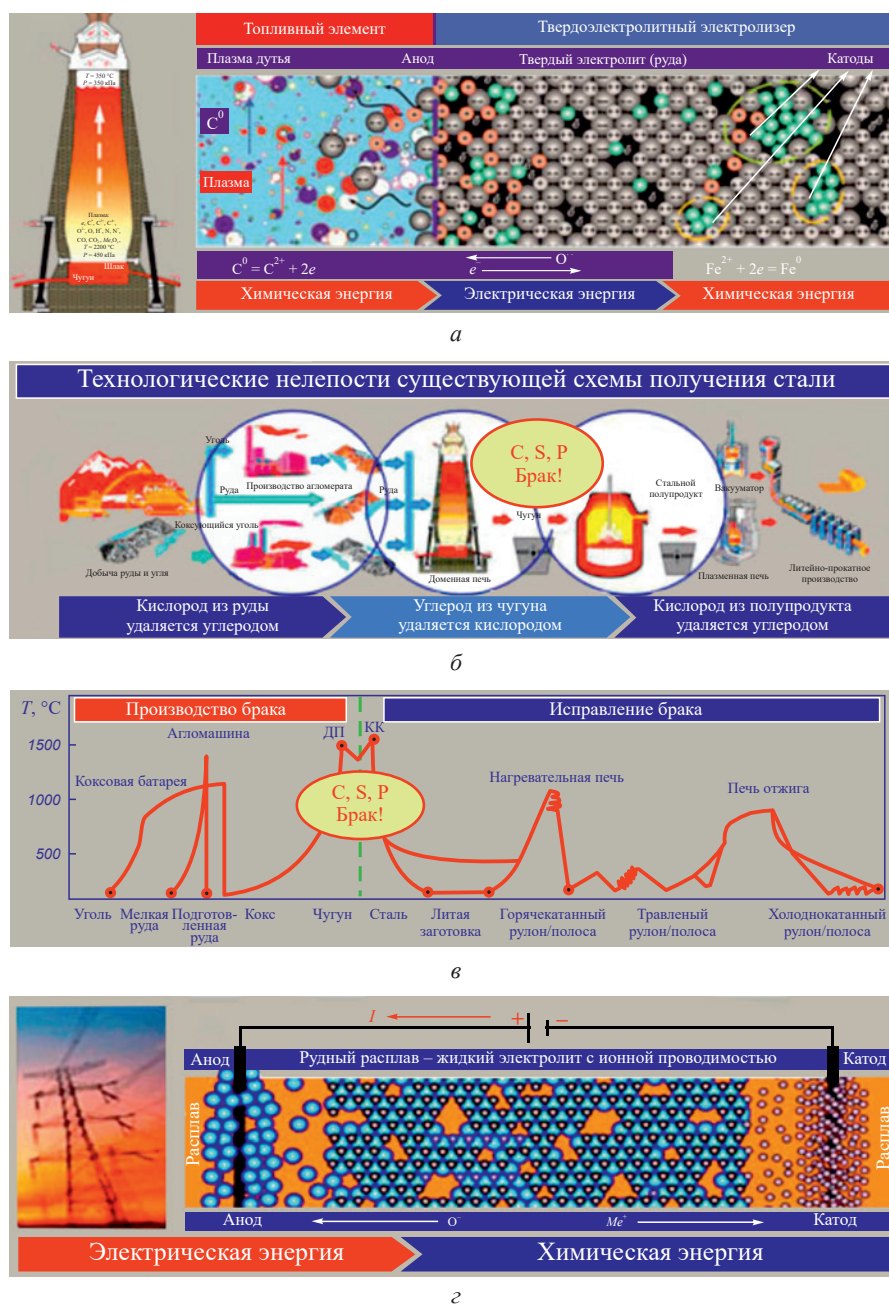


Рис. 3. Преобразования и потери энергии при использовании углеродного топливного элемента по существующей технологии (а – в) и электроэнергии из электрической сети (г)

Fig. 3. Conversion and loss of energy when using a carbon fuel cell according to the existing technology (a – в) and electricity from electric network (г)

ность и относительно невысокая стоимость углеродных материалов, используемых в качестве источника тепловой энергии и одновременно в качестве восстановителей. Но следует помнить, что эта технология исторически появилась и развивалась вследствие необходимости передела брака, когда в сыродутном горне в результате повышения температуры и насыщения железа углеродом был получен брак: хрупкий чугун вместо малоуглеродистого пластичного железа. Производство и передел брака оказались целесообразными благодаря доступности и относительно невысокой стоимости углеродсодержащих восстановителей (сначала дров, затем последовательно древесного и каменного углей). В настоящее время для производства чугуна используется самое дорогое твердое топливо – кокс, который получают из дефицитных сортов угля по сложной и экологически опасной технологии. В связи с дефицитом качественных коксующихся углей цена кокса непрерывно растет, а обеспечивать все возрастающие требования к качеству кокса становится все сложнее. При этом в доменных печах в связи с характером процессов восстановления теплотворная способность этого самого дефицитного и дорогого восстановителя не может быть использована более чем на 25 %, так как в процессе восстановления железа углерод кокса окисляется до оксида CO, а 75 % энергии выделяется уже при нецелевом «дожигании» CO до CO₂ [17].

Крайне низкое целевое (на восстановление) использование кокса к тому же сопровождается еще и растворением части углерода в железе с превращением железа в чугун. Эта растворившаяся часть углерода кокса является не просто потерей, а уже вредной примесью, которую при переделе чугуна в сталь удаляют продувкой чугуна кислородом, окисляя попутно и заметное количество ранее восстановленного в доменных печах коксом же железа (рис. 3, б). Окисленный расплав железа далее необходимо раскислить, в том числе тем же углеродом. С учетом еще и огромных тепловых потерь в многостадийном технологическом процессе превращения «брак» в целевой продукт производство по схеме «чугун – сталь» следует оценивать как крайне неэффективное, категорически не соответствующее требованиям энерго- и ресурсосбережения и не отвечающее современному уровню развития науки. На стадии передела чугуна в сталь к необходимости удаления первопричины брака (лишнего углерода) добавилась необходимость удалять также вносимые преимущественно на стадии получения чугуна коксом и добавочными материалами серу и фосфор. Таким образом, современная схема производства чугуна и последующего передела чугуна в сталь, по-сути, является процессом производства и исправления брака (рис. 3, б, в).

Учитывая непоследовательность существующей схемы производства (чередующиеся этапы восстановления – окисление, загрязнение – рафирование, нагрев – охлаждение) (рис. 3, в), затраты на добычу

и логистику дефицитного коксующегося угля и производства из него кокса, на производство агломерата и дополнительных расходных материалов, на строительство современных гигантских восстановительных агрегатов, на логистику, природоохранные и экологические мероприятия, затраты на электролиз, скорее всего, могут несущественно отличаться от затрат на производство и передел чугуна. Производство железа электролизом расплавов может оказаться конкурентноспособным уже в настоящее время при создании новых предприятий (рис. 3, г). К тому же, как показано выше, огромная производительность доменной печи достигается одновременной работой в ее объеме колоссально большого числа твердоэлектролитных электролизеров. Возможно, подобный принцип электровосстановления с использованием электроэнергии из электрической сети можно применить на стадии металлзации.

По-видимому, преувеличенными являются представления и о слишком высоких затратах на электроэнергию при электролизе железа. Во-первых, на получение электролизом 1 кг железа требуется в четыре раза энергии меньше по сравнению с таким же количеством алюминия. Во-вторых, необходимо учитывать, что запасы углей коксующихся сортов быстро сокращаются, в то время как доступность относительно дешевой электрической энергии благодаря развитию атомной энергетики увеличивается. В этой связи показательно, что интенсивные исследования электролитического производства железа ведутся в США и Франции, то есть в странах с наибольшим удельным весом атомных электростанций [14 – 16].

ВОДОРОДНЫЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Перспектива получения железа электролизом рудных расплавов представляется вполне реальной при извлечении его из богатых моноруд. В то же время имеются обширные запасы комплексных и бедных руд, трудно перерабатываемых или непригодных к переработке существующими методами. Целесообразность подготовки таких руд к электролизу расплавов представляется также сомнительной. Результаты наших исследований [18] показали, что в таких рудах железо можно восстанавливать селективно в твердой фазе, то есть при относительно низкой температуре, а после разделения продуктов металлзации плавлением получать чистое от углерода железо и концентрат оксидов невозстановленных металлов, обладающих меньшим по сравнению с железом сродством к электрону.

В связи с этим наряду с получением железа электролизом из богатых руд перспективными являются также исследования по селективному восстановлению железа в бедных и комплексных сидеритовых, железомарганцевых, титаномагнетитовых, ильменитовых

и других рудах с получением после разделения продуктов металлизации железа и концентрата оксидов активных металлов (магния, марганца, титана, хрома и других). При этом должна решаться задача не только максимально полного восстановления и извлечения железа, но также максимально полного сохранения ценных оксидов активных металлов в оксидной фазе. Результаты проведенных исследований показывают, что наиболее успешно решить эту задачу можно, если в качестве восстановителя вместо углерода использовать водород [19].

В больших промышленных масштабах единственной реальной альтернативой углероду как восстановителю железа является водород, поскольку это самый распространенный химический элемент во Вселенной. К тому же он является и одним из самых эффективных энергоносителей: при сжигании 1 кг водорода выделяется порядка 140 МДж энергии, в то время как сжигание 1 кг бензина дает примерно 50 МДж, а 1 кг угля – 20 – 25 МДж. Но на Земле свободного водорода в концентрированном виде нет, поэтому для использования водорода в качестве энергоносителя или восстановителя его необходимо производить, извлекая из распространенных на Земле химических соединений: оксида (воды) или углеводородов. В зависимости от

«углеродного следа» в производстве водорода его принято обозначать разными цветами: от «зеленого» с наименьшим «углеродным следом», получаемого электролизом воды за счет электроэнергии от возобновляемых источников энергии, до «коричневого», извлекаемого газификацией каменного угля. Наименьшим «углеродным следом» характеризуется «зеленый» водород, но одновременно он является и самым дорогим. Наиболее доступными и дешевыми способами получения водорода в настоящее время являются процессы разложения на водород и углерод ископаемых углеводородов, запасы которых богата Россия.

Благодаря ряду свойств (газовое состояние, высокое при низкой температуре и уменьшающееся при повышении температуры сродство к кислороду, ничтожная растворимость в твердом железе и другие), водород иногда оказывается более эффективным восстановителем, в частности, для селективного твердофазного восстановления железа в комплексных рудах.

Газообразный водород не может заменить твердое топливо в доменной печи, но вполне может использоваться в качестве восстановителя в уже существующих агрегатах прямого восстановления вместо природного газа (рис. 4). Аналогично углероду в доменной печи химическая энергия водорода при сжигании за счет

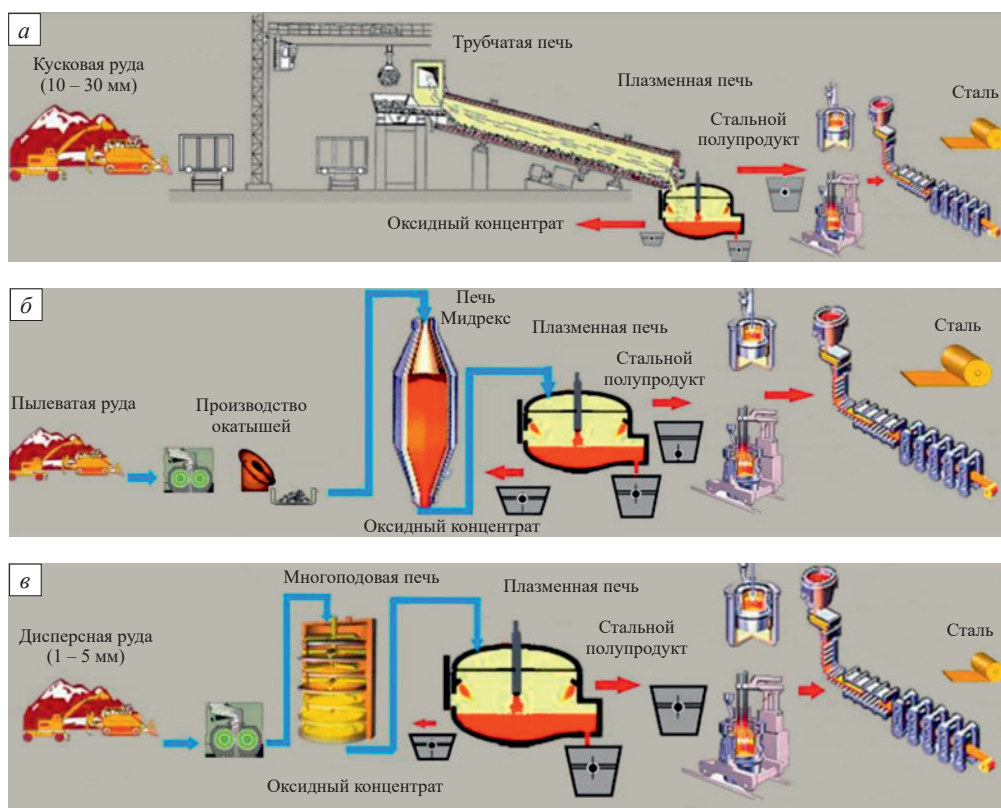


Рис. 4. Целесообразные схемы использования водорода в качестве восстановителя для селективного восстановления железа в комплексных рудах в существующих восстановительных агрегатах:
а – в трубчатых печах; б – в установках Мидрекс и Хилл; в – в многоподовых печах

Fig. 4. Reasonable schemes for the use of hydrogen as a reducing agent for selective reduction of iron in complex ores in existing reducing units:
а – in tubular furnaces; б – in Midrex and Hill installations; в – in multi-hearth furnaces

кислорода руды в топливном элементе восстановительного агрегата превращается в электрическую энергию, а затем за счет этой энергии происходит восстановление металла.

Анализ электрохимических процессов на основе водородного твердоэлектролитного топливного элемента показывает явные преимущества водорода по сравнению с углеродом для безотходной переработки комплексных и трудно перерабатываемых доменным процессом ильменитовых, титаномагнетитовых, железомарганцевых, сидеритовых и других руд с получением новых ценных продуктов: чистого безуглеродистого железа и ценных концентратов оксидов титана, марганца, магния и других активных металлов [18; 19]. В настоящее время для уже действующих установок существует экономически оправданная ниша использования относительно дешевых «серого» или «коричневого» водорода с целью получения из трудно перерабатываемых комплексных руд безуглеродистого мягкого железа и ценных оксидных концентратов (рис. 5).

Что же касается восстановления железа «зеленым» водородом, производимым путем электролиза воды и часто рассматриваемым в качестве панацеи от

опасных изменений климата [20 – 23], то его роль как гаранта устойчивого климата сомнительна, а экономически вряд ли когда-нибудь может быть оправдана. Это обусловлено тем, что получение и использование «зеленого» водорода в качестве восстановителя металлов включает последовательный двойной электролиз: сначала электролиз более прочного оксида водорода (воды) за счет электричества от возобновляемых источников энергии, а затем электролиз менее устойчивого оксида железа за счет электрической энергии водородного топливного элемента. К тому же, получение безуглеродистого железа путем восстановления «зеленым» водородом в дальнейшем предполагает его науглероживание при плавке в дуговых печах [24 – 26]. Поэтому несомненно, что более целесообразным всегда будет прямой электролиз менее прочных оксидов металла.

Выводы

В металлах нет атомов, в рудах нет молекул: и там, и там металлы присутствуют в виде катионов, связанных валентными электронами атомов металлов металлической связью в металлах или ионной связью в окси-

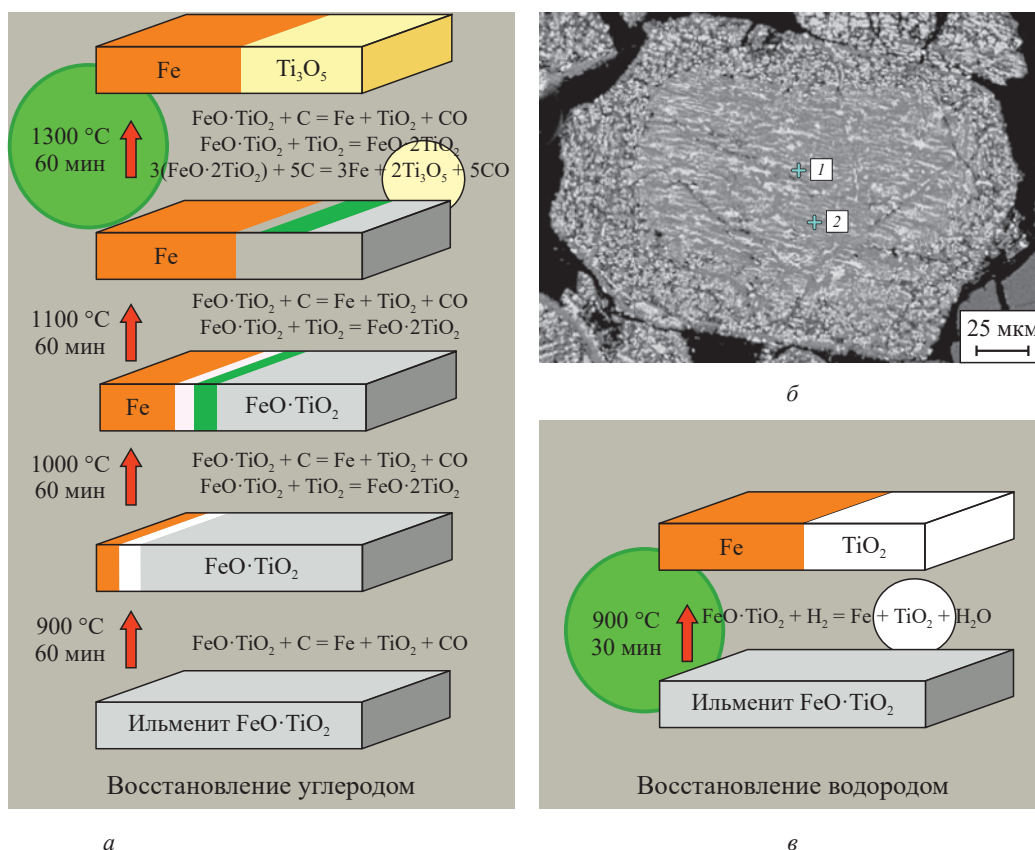


Рис. 5. Сравнение последовательности и параметров (температуры (T) и времени (t)) углеродного (а) и водородного (б, в) твердофазного селективного восстановления железа: 1 – 100 % Fe; 2 – 100 % TiO₂

Fig. 5. Comparison of sequence and parameters (temperature (T) and time (t)) of carbon (а) and hydrogen (б, в) solid-phase selective reduction of iron: 1 – 100 % Fe; 2 – 100 % TiO₂

дах руд. Окисление металлов заключается в потере валентных электронов атомами металлов и возвращении их катионам металлов при восстановлении, то есть окисление и восстановление являются электрохимическими процессами.

Электронная теория восстановления описывает процесс перехода валентных электронов от атомов восстановителя к катионам восстанавливаемого металла. Согласно теории в условиях восстановительных агрегатов газовая фаза находится в состоянии низкотемпературной плазмы, а оксиды руд обладают электрон-анионной проводимостью, благодаря чему для обмена электронами между восстановителями и катионами металлов в рудах даже не требуется физического контакта восстановителей с рудой.

«Свободные» электроны, обеспечивающие металлическую связь восстанавливаемых катионов, в восстановительных условиях возникают на поверхности руд вследствие перехода кислорода в восстановительную газовую фазу в виде атомов. Они компенсируют заряд аниона в образовавшейся анионной вакансии и одинаково взаимодействуют одновременно со всеми ближайшими к вакансии катионами, то есть являются носителями свойств будущей металлической фазы.

В комплексных рудах образовавшиеся на поверхности «свободные» электроны могут перемещаться вместе с анионными вакансиями в кристаллической решетке оксидов до встречи с катионами, обладающими в данных условиях максимальным сродством к электрону, тормозиться у них и в пустоте сливающихся анионных вакансий образовывать металлическую фазу. При этом выход кислорода в газовую фазу из одного оксида может приводить к восстановлению катионов в кристаллической решетке другого оксида.

Восстановительные агрегаты по физической сути работы являются электрохимическими устройствами, в которых последовательно работают два известных электрохимических устройства: топливный элемент, преобразующий химическую энергию восстановителя в электрическую энергию «свободных» электронов, и твердоэлектролитный электролизер, превращающий электрическую энергию этих электронов в энергию металлической связи восстанавливаемых катионов.

Поскольку заключительной стадией любой восстановительной реакции является поглощение «свободных» электронов восстанавливаемыми катионами, то принципиально самым прямым и коротким путем восстановления является получение «свободных» электронов на современных электростанциях и подвод их к катионам из электрической сети, то есть электролиз.

Электролиз расплавов с получением безуглеродного железа является перспективой развития технологий переработки богатых железных моноруд. Многообещающим направлением развития технологий переработки комплексных и бедных руд является селектив-

ное восстановление железа при относительно низкой температуре водородом с получением безуглеродного железа и оксидных концентратов более активных металлов (марганца, хрома, титана и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Любан А.П. Анализ явлений доменной плавки. Москва: Metallurgizdat; 1962:532.
2. Bogdandy L., Engell H.-J. The Reduction of Iron Ores. Scientific Basis and Technology. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag; 1971:576. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-10400-2>
3. Металлургия чугуна / Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвистнев и др. Москва: Металлургия; 1989:512.
4. Ghosh A., Chatterjee A. Ironmaking and Steelmaking: Theory and Practice. PHI Learning Pvt. Ltd.; 2008:472.
5. Основы теории и технологии доменной плавки / А.Н. Дмитриев, Н.С. Шумаков, Л.И. Леонтьев, О.П. Онорин. Екатеринбург: УрО РАН; 2005:545.
6. Начала металлургии: учебник для вузов / В.И. Коротич, С.С. Набойченко, А.И. Сотников и др. Екатеринбург: УГТУ; 2000:392.
7. Коновалов Ю.В., Троянский А.А., Тимошенко С.Н. Металлургия: учебное пособие в трех книгах. Книга 1. Производство чугуна, железа, стали и ферросплавов. Донецк: ДонГТУ; 2011:431.
8. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. Металлургия железа. Москва: ИКЦ «Академкнига»; 2007: 464.
9. Рошин В.Е., Рошин А.В. Общая электронная теория восстановления (окисления) металлов. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020;63(3-4):271–285. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-3-4-271-285>
Roshchin V.E., Roshchin A.V. General electron theory of reduction and oxidation of metals. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020;63(3-4):271–285. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-3-4-271-285>
10. Рошин В.Е., Рошин А.В. Физика пирометаллургических процессов. Учебник. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия; 2021:304.
11. Пономаренко А.Г. Вопросы термодинамики фаз переменного состава, имеющих коллективную электронную систему. IV. Уровень Ферми в оксидных фазах. *Журнал физической химии*. 1974;XLVIII(8):1954–1958.
Ponomarenko A.G. Issues of thermodynamics of phases of variable composition having a collective electronic system. IV. The Fermi level in oxide phases. *Journal of Physical Chemistry*. 1974;XLVIII(8):1954–1958. (In Russ.).
12. Металлургия алюминия. Технология, электроснабжение, автоматизация / Г.В. Галевский, Н.М. Кулагин, М.Я. Миндис, Г.А. Сиразутдинов. Москва: Флинта: Наука; 2017:529.
13. Lopes D.V., Quina M.J., Frade J.R., Kovalevsky A.V. Prospects and challenges of the electrochemical reduction of iron oxides in alkaline media for steel production. *Frontiers in Materials*. 2022;9:1010156. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.1010156>
14. Boston Metal: электролиз как чистая альтернатива производству стали. URL: <https://econet.ru/articles/boston-metal-elektroliz-kakchistaya-alternativa-proizvodstvu-stali> (Дата обращения 10.06.2025).

- Boston Metal: electrolyzing as a pure alternative to manufacturing. Available at URL: <https://econet.ru/articles/boston-metal-elektroliz-kakchistaya-alternativa-proizvodstvu-stali> (Accessed 10.06.2025). (In Russ.).
15. Mehta A. Meet the green technologies set to transform the geopolitics of steelmaking. Available at URL: <https://www.reuters.com/sustainability/decarbonizing-industries/meet-green-technologies-set-transform-geopolitics-steelmaking-2025-05-28/>. (Accessed 10.06.2025).
 16. Humbert M.S., Brooks G.A., Duffy A.R., etc. Economics of electrowinning iron from ore for green steel production. *Journal of Sustainable Metallurgy* 2024;10:1679–1701. <https://doi.org/10.1007/s40831-024-00878-3>
 17. Павлов В.В. Несообразности металлургии. Екатеринбург: Изд-во УГТУ; 2013:212.
 18. Пат. 2826667 С1 РФ МПК C22B5/02 C22B1/00. Получение оксидов активных металлов и концентратов из комплексных и трудно перерабатываемых железосодержащих руд селективным восстановлением элементов / В.Е. Рошин, Ю.С. Кузнецов, П.А. Гамов, С.П. Салихов, К.И. Смирнов, Б. Сулеймен, Н. Косдаулетов, Г. Адиллов, А. Бильгенов, Е.В. Григорьев. Заявл. 07.03.2024, опубл. 16.09.2024. Бюл. 26.
 19. Smirnov K.I., Gamov P.A., Roshchin V.E. Justification of a rational processing scheme for ilmenite concentrate with production of soft iron and titanium dioxide concentrate. *CIS Iron and Steel Review*. 2025;29:4–10. <https://doi.org/10.17580/cisirs.2025.01.01>
 20. Patisson F., Mirgaux O. Hydrogen ironmaking: How it works. *Metals*. 2020;10(7):922. <https://doi.org/10.3390/met10070922>
 21. Ma Y., Filho I.R.S., Bai Y., Schenk J., Patisson F., Beck A., van Bokhoven J.A., Willinger M.G., Li K., Xie D., Ponge D., Zaefferer S., Gault B., Mianroodi J.R., Raabe D. Hierarchical nature of hydrogen-based direct reduction of iron oxides. *Scripta Materialia*. 2022;213:114571. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2022.114571>
 22. Cavaliere P. Hydrogen Assisted Direct Reduction of Iron Oxides. Springer Cham; 2002:399. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-98056-6>
 23. Lungen H.B., Schmöle P. The way the European steel industry wants to become carbon neutral. In: *Proceedings of 9th European Coke and Ironmaking Congress (ECIC 2024). Coal, Coke, Biocoal, Biocoke, Biochar and Iron Reductions. Italy, Bardolino, 16 – 18 October 2024*. Italy: Associazione Italiana di Metallurgia (AIM); 2024:1–12.
 24. West K. High-temperature molten oxide electrolysis steelmaking (ULCOLYSIS). Available at URL: <https://energy.nl/data/high-temperature-molten-oxide-electrolysis-steelmaking-ulcolysis/> (Accessed 10.06.2025).
 25. Electrolysis in ironmaking. Fact sheet. Available at URL: <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-Electrolysis-in-ironmaking.pdf> (Accessed 10.06.2025).
 26. Primary Exploration of Hydrogen Metallurgy. Zhang J., Li K., Liu Z., Yang T. eds. Springer. Springer: 2024:410.

Сведения об авторах

Information about the Authors

Василий Ефимович Рошин, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Водородные технологии в металлургии», Южно-Уральский государственный университет

ORCID: 0000-0003-3648-8821

E-mail: roshchinve@susu.ru

Антон Васильевич Рошин, д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Водородные технологии в металлургии», Южно-Уральский государственный университет

ORCID: 0000-0003-4840-4410

E-mail: roshchinav@susu.ru

Vasilii E. Roshchin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Researcher of the Research Laboratory "Hydrogen Technologies in Metallurgy", South Ural State University

ORCID: 0000-0003-3648-8821

E-mail: roshchinve@susu.ru

Anton V. Roshchin, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Leading Researcher of the Research Laboratory "Hydrogen Technologies in Metallurgy", South Ural State University

ORCID: 0000-0003-4840-4410

E-mail: roshchinav@susu.ru

Поступила в редакцию 27.03.2025

После доработки 23.06.2025

Принята к публикации 23.06.2025

Received 27.03.2025

Revised 23.06.2025

Accepted 23.06.2025

Над номером работали:

Л.И. Леонтьев, главный редактор

Е.В. Протопопов, заместитель главного редактора

Е.А. Ивани, ответственный секретарь

Л.П. Бащенко, заместитель ответственного секретаря

Е.Ю. Потапова, заместитель главного редактора по развитию

О.А. Долицкая, научный редактор

В.В. Расенец, верстка, иллюстрации

Г.Ю. Острогорская, менеджер по работе с клиентами

Подписано в печать 20.08.2025. Формат 60×90 ¹/₈. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 13,5. Заказ 22788. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского Дома МИСИС.
119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1.
Тел./факс: +7 (499) 236-76-17



Modeling the distribution of components emitted from oiled scale between water, gas, and dust media in blast furnace dedusting plant

Modeling the operation of ferroalloy furnace with increased power and electrode diameters

Promising designs of gas analyzers for metallurgy

Prospects for creation of high-speed high-entropy steels

Limiting energy characteristics during laser pulse treatment of tungsten-cobalt hard alloys

Calculation of temperature and thermoelastic stresses in strikers during production of hollow steel billets in a unit of combined casting and deformation. Part 1

Modeling and optimization of the effect of temperature seams on stress-strain state of spherical metal casting molds

Metallization of ore-coal briquettes in an annular furnace heated by generator gas

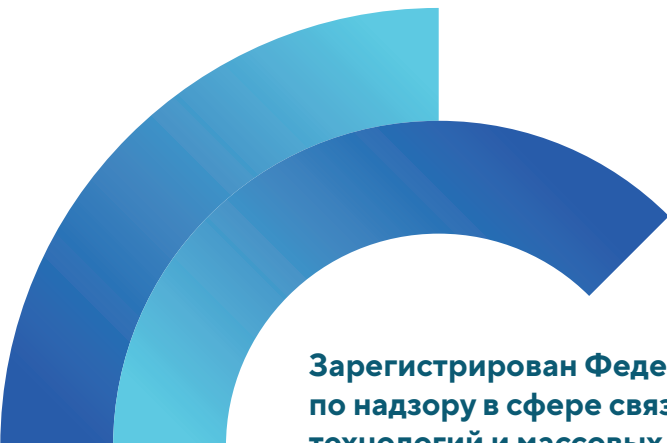
Improving the design and thermal operation of a rotary kiln for production of metallurgical lime from chalk

Information modeling system for assessing instability of blast furnace functioning

Mathematical model of the blast furnace main trough lining condition

Methodology for calculating the flatness of cold-rolled steel strips

Electrochemistry of reduction processes and prospects for the development of reduction technologies



**Зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77-35456.**

Подписной индекс 70383.

