

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 64 Номер 4 2021



• МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Высокоэнтропийные сплавы: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение

Структура и свойства поверхностного слоя стали 40Х, подвергнутой электромеханической обработке с динамическим силовым воздействием

• РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Гидрометаллургическое обогащение полиметаллических и железомарганцевых руд

• ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

Математическое моделирование процесса заполнения жидким металлом кристаллизатора УНРС при его подаче из вращающегося погружного стакана



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

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 64, Номер 4, 2021

Научно-технический журнал
Издается с января 1958 г. ежемесячно

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

Volume 64, Number 4, 2021

Scientific and Technical Journal
Published since January 1958. Issued monthly

Москва / Moscow, 2021

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

www.fermet.misis.ru

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

Варианты названия:

Известия вузов. Черная металлургия
Izvestiya. Ferrous Metallurgy

Учредители:



Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС» (НИТУ МИСиС)



Сибирский государственный индустриальный университет

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Главный редактор:

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

Заместитель главного редактора:

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

Адреса редакций:

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

E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@sis.ru

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

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

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

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



Статьи доступны под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

www.fermet.misis.ru

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

Alternative title:

Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya
Izvestiya. Ferrous Metallurgy

Founders:



National University of Science
and Technology "MISIS"



Siberian State Industrial University

Editor-in-Chief:

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

Deputy Editor-in-Chief:

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

Editorial Addresses:

4 Leninskii Ave., Moscow 119991, Russian Federation
National University of Science and Technology "MISIS"
Tel.: +7 (495) 638-44-11

E-mail: fermet.misis@mail.ru, ferrous@sisu.ru

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

Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Linn Horst, Linn High Therm GmbH, Hirschbach, Germany

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Journal "Izvestiya. Ferrous metallurgy" is included in the "List of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, in which should be published major scientific results of dissertations for the degree of doctor and candidate of sciences" by the decision of the Higher Attestation Commission.

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

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



Articles are available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Осинцев К.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А. Высокоэнтропийные сплавы: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение 249
- Дудкина Н.Г., Арисова В.Н. Структура и свойства поверхностного слоя стали 40Х, подвергнутой электромеханической обработке с динамическим силовым воздействием 259

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Полевой Е.В., Симонов Ю.Н., Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Башенко Л.П. Исследование фазовых и структурных превращений при формировании сварного соединения из рельсовой стали. Сообщение 2. Изотермическая диаграмма кинетики распада переохлажденного аустенита рельсовой стали R350LHT 266

РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ
В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

- Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Рыбенко И.А., Голодова М.А., Израильский А.О. Гидрометаллургическое обогащение полиметаллических и железомарганцевых руд 273

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ
ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

- Гolik В.И., Дмитрак Ю.В., Разоренов Ю.И., Маслеников С.А., Ляшенко В.И. Механохимическая технология извлечения железа из хвостов обогащения 282
- ГлушакOVA О.В., Черникова О.П. Влияние предприятий черной металлургии на качество атмосферного воздуха как экологической составляющей устойчивого развития территорий. Сообщение 1 292

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ
ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

- ОдинокOV В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Александров С.Ю., Усанов Г.И. Математическое моделирование процесса заполнения жидким металлом кристаллизатора УНРС при его подаче из вращающегося погружного стакана 302

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

- Мышляев Л.П., Венгер К.Г., Грачев В.В., Ивушкин К.А. Задачи идентификации структур материалов на основе фрактальных представлений 311

MATERIAL SCIENCE

- Osintsev K.A., Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Panchenko I.A. High-entropy alloys: Structure, mechanical properties, deformation mechanisms and application 249
- Dudkina N.G., Arisova V.N. Surface layer of 40Kh steel after electro-mechanical treatment with dynamic force impact 259

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- Polevoi E.V., Simonov Yu.N., Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Bashchenko L.P. Phase and structural transformations when forming a welded joint from rail steel. Report 2. Isothermal diagram of decomposition of supercooled austenite of R350LHT rail steel 266

RESOURCE SAVING
IN FERROUS METALLURGY

- Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Rybenko I.A., Golodova M.A., Izrail'skii A.O. Hydrometallurgical enrichment of polymetallic and ferromanganese ore 273

ECOLOGY AND RATIONAL USE
OF NATURAL RESOURCES

- Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Razorenov Yu.I., Maslennikov S.A., Lyashenko V.I. Mechanochemical technology of iron extraction from enrichment tailings 282
- Glushakova O.V., Chernikova O.P. Influence of ferrous metallurgy enterprises on atmospheric air quality as an ecological component of territories sustainable development. Report 1 292

INNOVATIONS IN METALLURGICAL INDUSTRIAL
AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES
AND MATERIALS

- Odinokov V.I., Evstigneev A.I., Dmitriev E.A., Aleksandrov S.Yu., Usanov G.I. Mathematical modeling of filling the CCM mold with liquid metal during its supply from a rotating submersible nozzle 302

INFORMATION TECHNOLOGIES
AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

- Myshlyayev L.P., Wenger K.G., Grachev V.V., Ivushkin K.A. Problem of identification of materials structures based on fractal representations 311



Обзорная статья

УДК 536.425:539.25

DOI 10.17073/0368-0797-2021-4-249-258



ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ СПЛАВЫ: СТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, МЕХАНИЗМЫ ДЕФОРМАЦИИ И ПРИМЕНЕНИЕ

К. А. Осинцев^{1,2}, В. Е. Громов¹, С. В. Коновалов^{1,2},

Ю. Ф. Иванов³, И. А. Панченко¹

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

² Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское ш. 34)

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

Аннотация. Выполнен краткий обзор публикаций зарубежных исследователей по изучению структуры, фазового состава и свойств пяти-компонентных высокоэнтروпийных сплавов (ВЭС) в разных структурных состояниях в широком диапазоне температур за последние два десятилетия. Высокоэнтропийные сплавы привлекают внимание ученых уникальными и необычными свойствами. Отмечены трудности проведения сравнительного анализа и обобщения данных из-за различных методов получения ВЭС, режимов механических испытаний на одноосное сжатие и растяжение, размеров и формы образцов, видов термических обработок, фазового состава (ОЦК и ГЦК решетки). Отмечено, что ВЭС с ОЦК решеткой обладают преимущественно высокой прочностью и низкой пластичностью, а ВЭС с ГЦК решеткой – низкой прочностью и повышенной пластичностью. Показано, что значительное повышение свойств ВЭС FeMnCoCrNi с ГЦК решеткой может быть достигнуто легированием бором и оптимизацией параметров термомеханической обработки при легировании углеродом в количестве 1 % (ат.). Проанализированные в температурном интервале $-196 \div 800$ °С деформационные кривые свидетельствуют о росте предела текучести с уменьшением размера зерна от 150 до 5 мкм. При снижении температуры предел текучести и относительное удлинение возрастают. Эффект влияния скорости деформации на механические свойства заключается в росте предела прочности и текучести, наиболее заметно проявляется при больших скоростях $10^{-2} \div 10^3$ с⁻¹. Отмечены особенности деформационного поведения ВЭС в моно- и поликристаллическом состояниях. Комплекс высоких эксплуатационных свойств ВЭС обеспечивает возможность их применения в различных отраслях промышленности. Отмечены перспективы использования энергетических обработок для модифицирования поверхностных слоев и дальнейшего повышения свойств ВЭС.

Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы, структура, механические свойства, дислокации, двойникование

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

Для цитирования: Осинцев К.А., Громов В.Е., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Панченко И.А. Высокоэнтропийные сплавы: структура, механические свойства, механизмы деформации и применение // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 4. С. 249–258.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-249-258>

Review

HIGH-ENTROPY ALLOYS: STRUCTURE, MECHANICAL PROPERTIES, DEFORMATION MECHANISMS AND APPLICATION

K. A. Osintsev^{1,2}, V. E. Gromov¹, S. V. Konovalov^{1,2},

Yu. F. Ivanov³, I. A. Panchenko¹

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

² Samara National Research University (34 Moskovskoe Route, Samara 443086, Russian Federation)

³ Institute of High Current Electronics Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk 634021, Russian Federation)

Abstract. The article considers a brief review of the foreign publications on the study of the structure, phase composition and properties of five-component high-entropy alloys (HEAs) in different structural states in a wide temperature range over the past two decades. HEAs attract the attention of scientists with their unique and unusual properties. The difficulties of comparative analysis and generalization of data are noted due to different methods of obtaining HEAs, modes of mechanical tests for uniaxial compression and tension, sizes and shapes of the samples, types of thermal treatments, and phase composition (bcc and fcc crystal lattices). It is noted that the HEA with a bcc lattice has mainly high strength and low plasticity, and the HEA

with a fcc lattice has low strength and increased plasticity. A significant increase in the properties of the FeMnCoCrNi HEA with a fcc lattice can be achieved by alloying with boron and optimizing the parameters of thermal mechanical treatment at alloying with carbon in the amount of 1 % (at.). The deformation curves analyzed in the temperature range $-196 \div 800$ °C indicate an increase in the yield strength with a decrease in the grain size from 150 to 5 microns. As the temperature decreases, the yield strength and elongation increase. The effect of deformation rate on the mechanical properties is an increase in the ultimate strength and yield strength, which is most noticeable at high rates of $10^{-2} \div 10^3$ s⁻¹. The features of HEAs deformation behavior in the mono- and poly-crystalline states are noted. The complex of high operational properties of HEAs makes it possible to use them in various industries. There are good prospects of using energy treatment to modify the surface layers and further improve HEAs properties.

Keywords: high-entropy alloy (HEA), structure, mechanical properties, dislocations, twinning

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

For citation: Osintsev K.A., Gromov V.E., Kononov S.V., Ivanov Yu.F., Panchenko I.A. High-entropy alloys: Structure, mechanical properties, deformation mechanisms and application. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 249–258. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-249-258>

ВВЕДЕНИЕ

Одной из фундаментальных и практически важных задач физики конденсированного состояния и физического материаловедения является разработка физических основ создания новых металлических материалов и технологий их получения с комплексом необходимых физико-механических и эксплуатационных характеристик. В самом конце XX века появились первые работы по созданию и комплексному исследованию новых, так называемых высокоэнтропийных полиметаллических сплавов (ВЭС), включающих до 5–6 основных элементов, каждый в большой концентрации (например, от 5 до 35 %). В качестве первых кандидатов в такие материалы были выбраны сплавы систем AlCoCrCuFeNi, CoCrCuFeNiTi и другие. Данные материалы наряду с характеристиками, типичными для металлических сплавов, обладают уникальными и необычными свойствами, присущими, например, металлокерамикам: высокой твердостью и стойкостью по отношению к температурному разупрочнению, дисперсионным твердением, положительным температурным коэффициентом упрочнения, высокими прочностными характеристиками при повышенных температурах, высокими износостойкостью и коррозионной стойкостью, рядом других характеристик. Главная особенность ВЭС заключается в формировании однофазного стабильного термодинамически устойчивого и высокопрочного твердого раствора замещения преимущественно с ГЦК или ОЦК решеткой [1]. Стабилизация твердого раствора и предотвращение образования интерметаллических фаз при кристаллизации обеспечиваются высокой энтропией смешения компонентов ($S_{mix} > 1,61R$, где R – универсальная газовая постоянная) в исходном (шихта) и жидком (расплав) состояниях. Максимальное значение энтропии достигается при эквимолярном соотношении элементов. За последние годы опубликованы (в основном в зарубежной литературе) несколько обзоров [1–6], которые отражают авторский взгляд на наиболее интересные свойства ВЭС. В этих работах описана термодинамика ВЭС, рассмотрены результаты моделирования их структуры, обсуждены новые варианты методов получения многокомпонентных сплавов.

Уже первые исследования выявили существенные различия в структуре разных высокоэнтропийных сплавов. Были обнаружены высокоэнтропийные сплавы на основе твердого раствора [7, 8], смеси интерметаллидных фаз [9, 10], аморфной фазы [11, 12], а также сплавы с более сложной многофазной структурой [4–13].

В последние два десятилетия наблюдается экспоненциальный рост количества публикаций, посвященных созданию однофазных эквиатомных пятикомпонентных ВЭС типа CrMnFeNi, AlCoCrFeNi [14], а также комплексно концентрированных сплавов (ККС). Несмотря на значительное количество работ, провести строгий, прямой сравнительный анализ структурно-фазовых состояний и механических свойств ВЭС и ККС одного состава крайне затруднительно. В работе [15] отмечено, что: «Прямое сравнение данных затруднено из-за различий в типе и концентрации основных элементов, виде термомеханической обработки, температуре и продолжительности термообработки». Проанализируем, тем не менее, последние основополагающие работы по пятикомпонентным сплавам.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Механические свойства ВЭС

Свойства ВЭС определяются их структурой и элементарным составом. Так, высокоэнтропийные сплавы с ОЦК решеткой имеют преимущественно высокую прочность и низкую пластичность, тогда как у материалов с ГЦК решеткой низкая прочность и высокая пластичность. При анализе механических свойств при одноосном сжатии значения основных параметров ВЭС мало отличаются от параметров промышленных легированных сталей. Активация механизмов двойникования для сплава Al_{0.3}CoCrFeNi обеспечивает деформацию до 97 %, а прочность составляет 1378 МПа [16], а в двухфазном сплаве AlCoCrFeNi предел прочности может достигать 4390 МПа [19]. Эти значения, по мнению авторов обзора [14], могут быть явно завышены из-за особенностей установки на сжатие, формы и размеров образцов.

Автоматически переносить уникальные результаты при сжатии на данные при растяжении также не

правомерно. Причинами таких ошибок могут являться неучет наличия наноразмерных интерметаллидов и выделений, ближний порядок в однофазном ОЦК или двухфазном ГЦК + ОЦК сплавах.

В настоящей работе кратко рассмотрены наиболее интересные и любопытные результаты многочисленных исследований механических свойств ВЭС при разных температурах. В работе [7] при изучении механических свойств сплавов CrMnFeCoNi и CrFeCoNi, подвергавшихся растяжению в диапазоне температур от -196 до 1000 °С, выявлена их высокая пластичность при комнатной температуре. Так, пластичность и твердость при снижении температуры повышались, при этом предел прочности возрастал практически вдвое, а относительное удлинение до разрушения – в 1,5 раза (до 60 %).

Превосходные механические свойства высокоэнтропийного сплава AlCoCrFeNiTi при комнатной температуре описаны в работе [17]. Улучшение механических характеристик с учетом большого радиуса атома титана авторы объяснили твердорастворным упрочнением. Наилучшие механические характеристики показал сплав AlCoCrFeNiTi_{0,5}: предел текучести составляет 2,26 ГПа, прочность на разрыв – 3,14 ГПа, пластическая деформация – 23,3 %.

Детальное рассмотрение механических характеристик ВЭС при низких температурах проведено в работах [18, 19]. Сплав AlCoCrFeNi обладает превосходными механическими характеристиками как при комнатной, так и при криогенной температурах [18]. Обнаружено увеличение пределов текучести и прочности при снижении температуры от 298 до 77 К на 29,7 и 19,9 % соответственно. Согласно интерпретации авторов механические характеристики улучшаются при наличии однофазной ОЦК структуры твердого раствора.

Значения механических свойств однофазных ГЦК ВЭС близки к величинам для сплавов на основе никеля и аустенитных нержавеющей сталей с одинаковыми легирующими элементами. В работе [20] отмечается, что существенно улучшенные свойства ВЭС FeMnCoCrNi (920 МПа и 52 %) достигаются легированием бором. Это приводит к сегрегации бора на границах зерен, уменьшению размера зерен, ослаблению межфазного упрочнения. При легировании углеродом (810 МПа, 66 %) [21] в междоузлиях увеличивается энергия дефекта упаковки для этого ВЭС. Отмечено, что оптимизация параметров термомеханической обработки ВЭС CoCrFeNiMn, легированного 1 % С (ат.), существенно улучшает механические свойства. Ключевая роль при этом принадлежит интерметаллидам типа $Me_{23}C_6$. На температурной зависимости удельной прочности для ВЭС CoCrFeMnNi [22] при температуре t выше 600 °С наблюдается падение, которое может быть устранено при одновременном легировании алюминием и титаном и кратковременном отжиге. К сожалению, в литературе

имеется ограниченное число публикаций о поведении ВЭС в области низких температур, а именно для этих целей первоначально создавался сплав CrMnFeCoNi. В области низких температур он обладает повышенными прочностными и пластическими свойствами и высокой ударной вязкостью [7 – 23].

Чистые ГЦК металлы практически не имеют температурной зависимости предела текучести в интервале 77 – 500 К [24]. Для ГЦК крупнозернистых Cantor ВЭС в этом интервале температур этот параметр увеличивается до четырех раз по мере уменьшения температуры [25].

Как правило, ВЭС обладают большей прочностью, чем обычные сплавы с меньшим числом элементов [25]. Необходимо иметь в виду, что в концентрированных твердых растворах эффективный радиус составляющих элементов существенно отличается от своего значения в чистых элементах [26]. Поэтому для определения их вкладов в твердорастворное упрочнение необходимо из первых принципов вычислить энергию взаимодействия с дислокациями для индивидуального растворенного элемента. На очевидный вопрос, о каких характеристиках идет речь при составлении композиции ВЭС, можно ответить, что это несоответствие объемов легирующих элементов. Основываясь на традиционных теориях твердых растворов, легче сказать, чем сделать это. Как можно измерить объемное несоответствие? Дело в том, что в ВЭС атомы смещены в разной степени. Для монокристаллов рентгеновские дифракционные исследования позволяют количественно определить параметр атомного смещения (АДР) [26] (АДР – это сумма площадей отклонения от равновесного положения из-за тепловых колебаний (динамический беспорядок) и статистического смещения из-за размерного эффекта).

При испытаниях на растяжение монокристаллов сплава CrMnFeCoNi в зависимости от температуры испытаний (77 – 423 К) и ориентации значения критического сдвигового напряжения меняются от 53 до 172 МПа [27 – 29]. Эти величины по крайней мере на порядок выше, чем для ГЦК чистого никеля.

При анализе термоактивируемого процесса пластической деформации важный параметр – активационный объем (составляет примерно $60b^3$ при 77 К и $360b^3$ при комнатной температуре). Это несколько меньше, чем в твердых растворах ($\sim 1000b^3$) (где b – вектор Бюргерса).

При квазистатических испытаниях (10^{-1} – 10^{-5} с⁻¹) для сплава с размером зерна 35 мкм влияние скорости деформации незначительно [7] (рис. 1). В диапазоне 10^{-3} – 10^2 с⁻¹ предел текучести растет примерно на 35 % (от 484 до 650 МПа) для сплава с размером зерна 10 мкм с соответствующим увеличением предела прочности от 853 до 968 МПа. При больших скоростях деформации еще более значительны: от 325 – 360 МПа при скоростях 10^{-4} – 10^{-2} с⁻¹ до 590 – 680 МПа при скоростях 3000 – 4700 с⁻¹ [30]. Это связано с фоновым механизмом торможения [30].

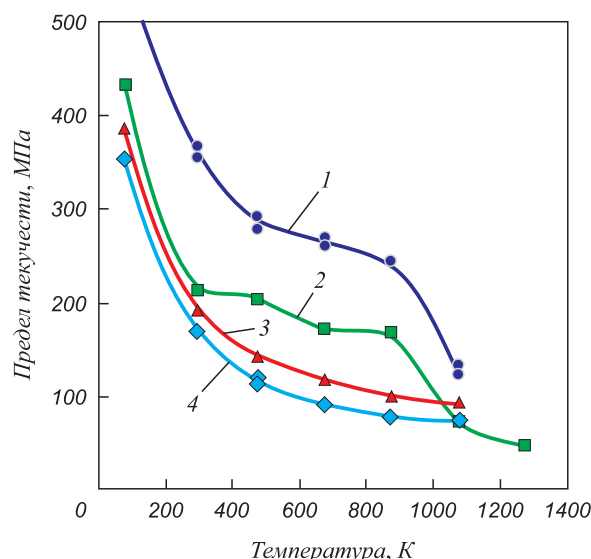


Рис. 1. Температурная зависимость предела текучести ВЭС CrMnFeCoNi для различных значений размера зерна [26, 27], мкм: 1 – 4; 2 – 35; 3 – 50; 4 – 155

Fig. 1. Temperature dependence of the yield strength of Cr MnFeCoNi HEA for different grain size values [26, 27], μm: 1 – 4; 2 – 35; 3 – 50; 4 – 155

Типичные кривые $\sigma(\epsilon)$ для ВЭС CrMnFeCoNi с размером зерна 50 мкм для разных температур приведены на рис. 2. При сжатии сплава CrMnFeCoNi с размером зерна 5 – 150 мкм напряжения течения растут с уменьшением размера за исключением высоких температур (800 °C), где сплав с зерном 5 мкм проявляет деформационное размягчение после текучести преимущественно по зернограничному деформационному механизму. Предел текучести, напряжение течения, удлинение увеличиваются при снижении температуры вплоть до температуры жидкого азота [7].

Дислокационная и двойниковая пластичность

Как и для ГЦК металлов в дислокационной субструктуре ВЭС наблюдается переход от хаоса при малых степенях деформации к клубкам и ячейкам при увеличении степени деформации (рис. 3). При этом нет различия в росте плотности дислокаций при комнатной температуре и 77 К, что соответствует температурной независимости скорости упрочнения ГЦК металлов при малых деформациях. При $\epsilon > 6\%$ начинает работать механизм двойникового, который становится преобладающим при $\epsilon > 9\%$. Двойниковый механизм пластичности способен одновременно увеличивать прочность и пластичность [31]. Аксиальные напряжения появления двойников при 77 К составляют примерно 720 МПа [32]. Общее мнение авторов: эти напряжения, в основном, не зависят от температуры.

Другим фактором, относящимся к двойникованию, является энергия дефекта упаковки: для тройного эквивалентного сплава CrCoNi на 25 % ниже, чем для

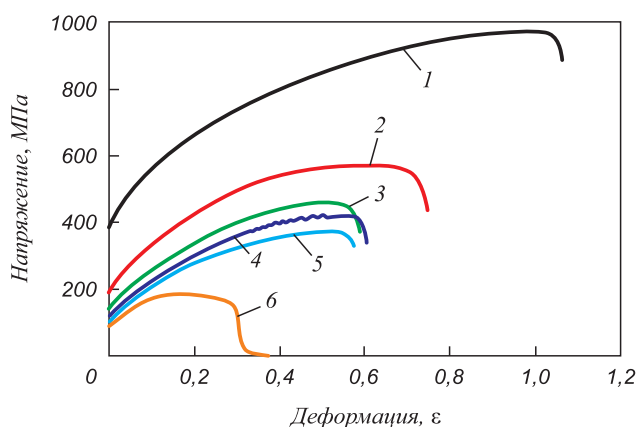


Рис. 2. Кривые напряжение – деформация для ВЭС CrMnFeCoNi при разных температурах [27], °C: 1 – -196; 2 – 20; 3 – 200; 4 – 400; 5 – 600; 6 – 800

Fig. 2. Stress-strain curves for CrMnFeCoNi HEA at different temperatures [27], °C: 1 – -196; 2 – 20; 3 – 200; 4 – 400; 5 – 600; 6 – 800

CrMnFeCoNi (22 и 30 мДж/м² соответственно) [33]. Более высокий уровень предела текучести для CrCoNi сплава позволяет достичь критического напряжения двойникового раньше по сравнению со сплавом CrMnCoNi.

Высокоэнтропийный сплав $\text{Fe}_{36}\text{Mn}_{21}\text{Cr}_{18}\text{Ni}_{15}\text{Al}_{10}$ в литом состоянии имеет ОЦК структуру с внедренными частицами В2 кубоидальной формы, состоящими, в основном, из алюминия и никеля. Предел текучести на сжатие и растяжение при комнатной температуре составляет 750 и 990 МПа соответственно, после 600 °C наблюдается заметное снижение до 310 и 360 МПа. При сжатии ВЭС демонстрирует заметную пластичность, начиная с комнатной температуры. При растяжении удлинение до разрушения составляет всего 2,5 %. Рост температуры приводит к умеренному увеличению пластичности при разрушении. Отжиг при 1000 °C приводит к началу образования ГЦК фазы. Микротвердость заметно снижается от 410 HV в литом состоянии до 310 HV после отжига при 1000 °C [34]. По мнению

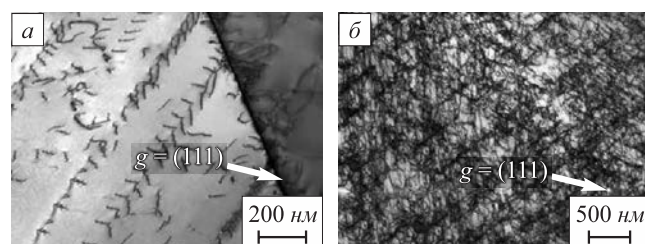


Рис. 3. Планарные дислокационные скопления на плоскости {111} ВЭС CrCoNi при разных степенях деформации: а – $\epsilon = 5\%$ при 77 К; б – $\epsilon = 22\%$ при комнатной температуре (ячеисто-сетчатая дислокационная субструктура) [40]

Fig. 3. Planar dislocation clusters on the {111} plane of CrCoNi HEA at different deformation degrees: а – $\epsilon = 5\%$ at 77 K; б – $\epsilon = 22\%$ at room temperature (cellular-mesh dislocation substructure) [40]

авторов этой работы трансформация ОЦК структуры в ГЦК связана с наличием алюминия. Эти 10 % Al меняют VEC (концентрацию валентных электронов) по сравнению со сплавами аналогичного состава на основе Co–Cr–Fe–Ni–Mn.

Монокристаллические сплавы

Многочисленные работы по ВЭС свидетельствуют об определяющей роли ориентации монокристаллов при испытаниях. При этом важно, какие точные методы определения двойникования использовались. Методы ПЭМ позволяют при $\varepsilon > 5\%$ для образцов, ориентированных для множественного скольжения, фиксировать начало двойникования. При ориентации для одиночного скольжения первоначально до 27 % основная роль принадлежит дислокационной активности. При ориентации множественного скольжения [001] двойникование вообще не наблюдалось. Известно также, что двойникование затруднено с уменьшением размера зерна [35], в монокристаллах оно реализуется при более низких напряжениях. Необходимо отметить, что дифракция обратно рассеянных электронов и другие методы уступают ПЭМ при оценке роли двойникования.

ВЭС с ОЦК и ГЦК решеткой

Снижение концентрации валентных электронов (VEC) в сплавах молибдена и ниобия уменьшает прочность на сдвиг [36], так что сплавы с низкой VEC легче деформируются и более пластичны. По сравнению с ГЦК сплавами ОЦК ВЭС сплавы меньше изучены из-за хрупкости при низких гомологических температурах. Исключение составляют сплавы NbMoTaW, VNbMoTaW, TiVZrNbHf и особенно TiZrNbHfTi [37]. После дуговой плавки и прессования (1473 К, 207 МПа, 3 ч) в нем образуется дендритная структура, которая исчезает после термомеханической обработки (холодная прокатка + рекристаллизация в течение 2 ч при 1000 °С) с образованием однородной зеренной структуры и однородного химического состава.

По сравнению с ГЦК ВЭС (например, CrMnFeCoNi) ОЦК сплав TiZrNbHfTa упрочняется меньше. Оценка параметра α в выражении $\Delta t = \alpha G b \sqrt{\rho}$ свидетельствует об определяющей роли барьера Пайерлса. Для сплава CrMnFeCoNi с ГЦК структурой основной вклад вносят дислокации «леса». Для зерен размерами 38,81 и 128 мкм предел текучести на растяжение ВЭС TiZrNbHfTa примерно одинаков – 950 МПа [38], что меньше, чем для зерен размера 22 мкм (1145 МПа) [37].

Теория и модели описания механических свойств ВЭС

Методы молекулярной динамики, используемые для описания механических свойств на основе модельных

представлений, приведены в работах [37–40]. Трудности в интерпретации пластичности ВЭС связаны с необходимостью понимания того, как движутся дислокации через композиционно разориентированные решетки. Количественный теоретический анализ механических свойств (таких, как деформационное упрочнение, пластичность, двойникование, разрушение, усталость) затруднен для ВЭС, поскольку нет еще однозначного подхода даже для разбавленных сплавов. Трудности обусловлены многокомпонентной природой состава ВЭС. В первую очередь должны быть преодолены трудности в определении роли ближнего порядка в механических свойствах ВЭС. Механизмы упрочнения Тэйлора (дислокационное взаимодействие), межфазное взаимодействие (взаимодействие дислокаций с границами зерен, двойников, частиц) изучены значительно лучше.

Области применения ВЭС

Высокоэнтропийные сплавы могут применяться, в частности, в ядерной энергетике, так как обладают высокой стойкостью к облучению [41], в качестве тугоплавких, магнитомягких материалов, а также материалов, используемых в металлообрабатывающей промышленности. В аэрокосмической промышленности могут найти применение ВЭС благодаря коррозионной стойкости, а также как материалы для хранения водорода [42, 43]. В работе [44] представлена разработанная авторами технология и описаны свойства нового класса сверхтвердых покрытий на основе высокоэнтропийных сплавов. Исходным материалом для напыления служит новый класс материалов: высокоэнтропийные сплавы. Использование усовершенствованных технологических режимов вакуумно-дугового напыления позволило на базе твердорастворимых высокоэнтропийных сплавов получить сверхтвердые покрытия, обладающие термостабильностью до 1100 °С [44]. Выявлено, что высокоэнтропийные однофазные нитридные покрытия на основе пяти нитридообразующих элементов характеризуются высокими значениями твердости (50–60 ГПа) и модуля упругости (более 600 ГПа). На формирование типа решетки нитридных покрытий наибольшее влияние оказывает теплота образования и преобладание нитридов с одним типом кристаллической решетки. Установлено, что высокоэнтропийные однофазные нитридные покрытия являются достаточно термостабильными [44].

Одна из перспективных областей применения нитридных покрытий на основе высокоэнтропийных сплавов – биомедицина. Защитные покрытия для биомедицинского применения должны обладать низким модулем эластичности, высокой химической стабильностью, износостойкостью и коррозионной стойкостью в физиологических средах, низким коэффициентом трения, биологической совместимостью и отличной адгезией к поверхности, на которую осаждаются защит-

ные покрытия [45]. Особо следует отметить работу [6], в которой спрогнозированы возможные области применения ВЭС в различных отраслях промышленности.

Значительного повышения характеристик поверхностных слоев металлов, сталей, легких сплавов можно достичь за счет использования внешних энергетических воздействий. Наиболее эффективными из них являются мощные электрические токи, электровзрывное легирование, обработка сильноточными низкоэнергетическими электронными пучками [46 – 48]. Такие внешние энергетические воздействия за счет модифицирования поверхностных слоев значительно повышают циклическую долговечность и износостойкость титана и титановых сплавов [48], нержавеющей сталей [49], легких сплавов [46], электроэрозионную стойкость выключателей мощных электрических цепей на основе меди [50]. Накопленные и проанализированные в представленных работах данные позволяют расширить области применения ВЭС в различных отраслях промышленности.

Выводы

Последние два десятилетия характеризуются появлением значительного числа работ по созданию, изучению и использованию высокоэнтропийных сплавов, содержащих до 5 – 6 основных элементов концентрацией от 5 до 35 %. По сравнению с типичными металлическими сплавами они проявляют уникальные свойства из-за их высокой твердости, термической и коррозионной стойкости, термостойкости при повышенных температурах и других. Проведена попытка выпол-

нить краткий анализ последних публикаций зарубежных авторов по формированию структурно-фазовых состояний и свойств в основном пятикомпонентных сплавов типа AlCoCrFeNi и областей их возможного применения. Отмечено, что несмотря на значительное количество работ проведение строгого сравнительного анализа затруднено в силу ряда объективных причин. Идет накопление экспериментального материала и его осмысление. Высокоэнтропийные сплавы с ОЦК решеткой имеют, преимущественно, высокую прочность и низкую пластичность, тогда как у материалов с ГЦК решеткой низкая прочность и высокая пластичность. Показано, что существенно улучшенные свойства ГЦК ВЭС FeMnCoCrNi достигаются легированием бором. Этого же можно достичь оптимизацией параметров термомеханической обработки при введении 1 % С (ат.). Анализ кривых деформации свидетельствует о росте предела текучести и относительного удлинения при понижении температуры до температуры жидкого азота.

Для ВЭС с ГЦК структурой при степени деформации $\varepsilon > 6\%$ наряду с дислокационным начинает работать механизм двойникования. При испытаниях монокристаллических ВЭС определяющая роль принадлежит ориентации. Фиксировать при множественном и одиночном скольжении начало двойникования лучше всего методами ПЭМ.

В зависимости от комплекса свойств ВЭС указаны области их применения. Сверхтвердые покрытия на основе ВЭС обладают термостабильностью. Показаны возможные перспективные области использования внешних энергетических воздействий для модифицирования поверхностных слоев ВЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Yeh J.W., Chen S.K., Lin S.J., Gan J.Y., Chin T.S., Shun T.T., Tsau C.H., Chang S.Y. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes // *Advanced Engineering Materials*. 2004. Vol. 6. No. 5. P. 299–303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
2. Zhang Y., Yang X., Liaw P.K. Alloy design and properties optimization of high-entropy alloys // *JOM*. 2012. Vol. 64. No. 7. P. 830–838. <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0366-5>
3. Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys // *Annales de Chimie. Science des Materiaux*. 2006. Vol. 31. No. 6. P. 633–648. <https://doi.org/10.3166/acsm.31.633-648>
4. Yeh J.W. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys // *JOM*. 2013. Vol. 65. No. 12. P. 1759–1771. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0761-6>
5. Zhang L.S., Ma G.-L., Fu L.-C., Tian J.-Y. Recent progress in high-entropy alloys // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 631–632. P. 227–232. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.631-632.227>
6. Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys // *Progress in Materials Science*. 2014. Vol. 61. P. 1–93. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
7. Gali A., George E.P. Tensile properties of high- and medium-entropy alloys // *Intermetallics*. 2013. Vol. 39. P. 74–78. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.03.018>

1. Yeh J.W., Chen S.K., Lin S.J., Gan J.Y., Chin T.S., Shun T.T., Tsau C.H., Chang S.Y. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced Engineering Materials*. 2004, vol. 6, no. 5, pp. 299–303. <https://doi.org/10.1002/adem.200300567>
2. Zhang Y., Yang X., Liaw P.K. Alloy design and properties optimization of high-entropy alloys. *JOM*. 2012, vol. 64, no. 7, pp. 830–838. <https://doi.org/10.1007/s11837-012-0366-5>
3. Yeh J.W. Recent progress in high-entropy alloys. *Annales de Chimie. Science des Materiaux*. 2006, vol. 31, no. 6, pp. 633–648. <https://doi.org/10.3166/acsm.31.633-648>
4. Yeh J.W. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys. *JOM*. 2013, vol. 65, no. 12, pp. 1759–1771. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0761-6>
5. Zhang L.S., Ma G.-L., Fu L.-C., Tian J.-Y. Recent progress in high-entropy alloys. *Advanced Materials Research*. 2013, vol. 631–632, pp. 227–232. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.631-632.227>
6. Zhang Y., Zuo T.T., Tang Z., Gao M.C., Dahmen K.A., Liaw P.K., Lu Z.P. Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in Materials Science*. 2014, vol. 61, pp. 1–93. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>
7. Gali A., George E.P. Tensile properties of high- and medium-entropy alloys. *Intermetallics*. 2013, vol. 39, pp. 74–78. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.03.018>

8. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2004. Vol. 375–377. P. 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
9. Jiang L., Lu Y., Dong Y., Wang T., Cao Z., Li T. Annealing effects on the microstructure and properties of bulk high-entropy CoCrFeNiTi_{0.5} alloy casting ingot // *Intermetallics*. 2014. Vol. 44. P. 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.08.016>
10. Shun T.-T., Chang L.-Y., Shiu M.-H. Microstructure and mechanical properties of multiprincipal component CoCrFeNiMo_x alloys // *Materials Characterization*. 2012. Vol. 70. P. 63–67. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.05.005>
11. Senkov O.N., Miracle D.B. A topological model for metallic glass formation // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2003. Vol. 317. No. 1–2. P. 34–39. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(02\)01980-4](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(02)01980-4)
12. Takeuchi A., Chen N., Wada T., Yokoyama Y., Kato H., Inoue A., Yeh J.W. Pd₂₀Pt₂₀Cu₂₀Ni₂₀P₂₀ high-entropy alloy as a bulk metallic glass in the centimeter // *Intermetallics*. 2011. Vol. 19. No. 10. P. 1546–1554. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2011.05.030>
13. Singh S., Wanderka N., Murty B.S., Glatzel U., Banhart J. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy // *Acta Materialia*. 2011. Vol. 59. No. 1. P. 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.09.023>
14. George E.P., Curtin W.A., Tسان C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms // *Acta Materialia*. 2020. Vol. 188. P. 435–474. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.015>
15. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts // *Acta Materialia*. 2017. Vol. 122. P. 448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
16. Raghavan R., Kirchlechner C., Jaya B.N., Feuerbacher M., Dehm G. Mechanical size effects in a single crystalline equiatomic FeCrCoMnNi high entropy alloy // *Scripta Materialia*. 2017. Vol. 129. P. 52–55. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.10.026>
17. Zhou Y.J., Zhang Y., Wang Y.L., Chen G.L. Solid solution alloys of AlCoCrFeNiTi_x with excellent room-temperature mechanical properties // *AIP Applied Physics Letters*. 2007. Vol. 90. Article 181904. <https://doi.org/10.1063/1.2734517>
18. Qiao J.W., Ma S.G., Huang E.W., Chuang C.P., Liaw, P.K., Zhang Y. Microstructural characteristics and mechanical behaviors of AlCoCrFeNi high-entropy alloys at ambient and cryogenic temperature // *Materials Science Forum*. 2011. Vol. 688. P. 419–425. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.688.419>
19. Gludovatz B., Hohenwarter A., Catoor D., Chang E.H., George E.P., Ritchie R.O. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications // *Science*. 2014. Vol. 345. No. 6201. P. 1153–1158. <https://doi.org/10.1126/science.1254581>
20. Seol J.B., Bae J.W., Li Z., Han J.Ch., Kim J.G., Raabe D., Kim H.S. Boron doped ultrastrong and ductile high-entropy alloys // *Acta Materialia*. 2018. Vol. 151. P. 366–376. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.04.004>
21. Slone C.E., Chakraborty S., Miao J., George E.P., Mills M.J., Niezgoda S.R. Influence of deformation induced nanoscale twinning and FCC-HCP transformation on hardening and texture development in medium-entropy CrCoNi alloy // *Acta Materialia*. 2018. Vol. 158. P. 38–52. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.07.028>
22. Wu Z., Bei H., Pharr G.M., George E.P. Temperature dependence of the mechanical properties of equiatomic solid solution alloys with face-centered cubic crystal structures // *Acta Materialia*. 2014. Vol. 81. P. 428–441. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.08.026>
23. Otto F., Dlouhy A., Somsen C., Bei H., Eggeler G., George E.P. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy // *Acta Materialia*. 2013. Vol. 61. No. 15. P. 5743–5755. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.06.018>
24. Wigley D.A. Mechanical properties of materials at low temperatures // *Cryogenics*. 1968. Vol. 8. No. 1. P. 3–12. [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(68\)80042-6](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(68)80042-6)
8. Cantor B., Chang I.T.H., Knight P., Vincent A.J.B. Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys. *Materials Science and Engineering: A*. 2004, vol. 375–377, pp. 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.10.257>
9. Jiang L., Lu Y., Dong Y., Wang T., Cao Z., Li T. Annealing effects on the microstructure and properties of bulk high-entropy CoCrFeNiTi_{0.5} alloy casting ingot. *Intermetallics*. 2014, vol. 44, pp. 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2013.08.016>
10. Shun T.-T., Chang L.-Y., Shiu M.-H. Microstructure and mechanical properties of multiprincipal component CoCrFeNiMo_x alloys. *Materials Characterization*. 2012, vol. 70, pp. 63–67. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2012.05.005>
11. Senkov O.N., Miracle D.B. A topological model for metallic glass formation. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2003, vol. 317, no. 1–2, pp. 34–39. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(02\)01980-4](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(02)01980-4)
12. Takeuchi A., Chen N., Wada T., Yokoyama Y., Kato H., Inoue A., Yeh J.W. Pd₂₀Pt₂₀Cu₂₀Ni₂₀P₂₀ high-entropy alloy as a bulk metallic glass in the centimeter. *Intermetallics*. 2011, vol. 19, no. 10, pp. 1546–1554. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2011.05.030>
13. Singh S., Wanderka N., Murty B.S., Glatzel U., Banhart J. Decomposition in multi-component AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2011, vol. 59, no. 1, pp. 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.09.023>
14. George E.P., Curtin W.A., Tسان C.C. High entropy alloys: A focused review of mechanical properties and deformation mechanisms. *Acta Materialia*. 2020, vol. 188, pp. 435–474. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.015>
15. Miracle D.B., Senkov O.N. A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*. 2017, vol. 122, pp. 448–511. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.08.081>
16. Raghavan R., Kirchlechner C., Jaya B.N., Feuerbacher M., Dehm G. Mechanical size effects in a single crystalline equiatomic FeCrCoMnNi high entropy alloy. *Scripta Materialia*. 2017, vol. 129, pp. 52–55. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.10.026>
17. Zhou Y.J., Zhang Y., Wang Y.L., Chen G.L. Solid solution alloys of AlCoCrFeNiTi_x with excellent room-temperature mechanical properties. *AIP Applied Physics Letters*. 2007, vol. 90, article 181904. <https://doi.org/10.1063/1.2734517>
18. Qiao J.W., Ma S.G., Huang E.W., Chuang C.P., Liaw, P.K., Zhang Y. Microstructural characteristics and mechanical behaviors of AlCoCrFeNi high-entropy alloys at ambient and cryogenic temperature. *Materials Science Forum*. 2011, vol. 688, pp. 419–425. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.688.419>
19. Gludovatz B., Hohenwarter A., Catoor D., Chang E.H., George E.P., Ritchie R.O. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications // *Science*. 2014. vol. 345, no. 6201, pp. 1153–1158. <https://doi.org/10.1126/science.1254581>
20. Seol J.B., Bae J.W., Li Z., Han J.Ch., Kim J.G., Raabe D., Kim H.S. Boron doped ultrastrong and ductile high-entropy alloys. *Acta Materialia*. 2018, vol. 151, pp. 366–376. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.04.004>
21. Slone C.E., Chakraborty S., Miao J., George E.P., Mills M.J., Niezgoda S.R. Influence of deformation induced nanoscale twinning and FCC-HCP transformation on hardening and texture development in medium-entropy CrCoNi alloy. *Acta Materialia*. 2018, vol. 158, pp. 38–52. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.07.028>
22. Wu Z., Bei H., Pharr G.M., George E.P. Temperature dependence of the mechanical properties of equiatomic solid solution alloys with face-centered cubic crystal structures. *Acta Materialia*. 2014, vol. 81, pp. 428–441. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.08.026>
23. Otto F., Dlouhy A., Somsen C., Bei H., Eggeler G., George E.P. The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2013, vol. 61, no. 15, pp. 5743–5755. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.06.018>
24. Wingley D.A. Mechanical properties of materials at low temperatures. *Cryogenics*. 1968, vol. 8, no. 1, pp. 3–12. [https://doi.org/10.1016/S0011-2275\(68\)80042-6](https://doi.org/10.1016/S0011-2275(68)80042-6)

25. Yeh J.W. Physical metallurgy of high-entropy alloys // *JOM*. 2015. Vol. 67. No. 10. P. 2254–226. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1583-5>
26. Okamoto N.L., Fujimoto S., Kambara Y., Kawamura M., Zhenghao M.T.C., Matsunoshita H., Tanaka K., Inui H., George E.P. Size effect, critical resolved shear stress, stacking fault energy, and solid solution strengthening in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. Article 35863. <https://doi.org/10.1038/srep35863>
27. Patriarca L., Ojha A., Sehitoglu H., Chumlyakov Y.I. Slip nucleation in single crystal FeNiCoCrMn high entropy alloy // *Scripta Materialia*. 2016. Vol. 112. P. 54–57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2015.09.009>
28. Kireeva I.V., Chumlyakov Yu.I., Pobedennaya Z.V., Kuksgausen I.V., Karaman I. Orientation dependence of twinning in single crystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy // *Materials Science and Engineering: A*. 2017. Vol. 705. P. 176–181. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.08.065>
29. Wu Z., Gao Y.F., Bei H. Single crystal plastic behavior of a single-phase, face-center-cubic-structured, equiatomic FeNiCrCo alloy // *Scripta Materialia*. 2015. Vol. 109. P. 108–112. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2015.07.031>
30. Park J.M., Moon J., Bae J.W., Jang M.J., Park J., Lee S., Kim H.S. Strain rate effects of dynamic compressive deformation on mechanical properties and microstructure of CoCrFeMnNi high-entropy alloy // *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 719. P. 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.02.031>
31. Zhang Z., Sheng H., Wang Z., Gludovatz B., Zhang Z., George E.P., Yu Q., Mao S.X., Ritchie R.O. Dislocation mechanisms and 3D twin architectures generate exceptional strength-ductility-toughness combination in CrCoNi medium-entropy alloy // *Nature Communications*. 2017. Vol. 8. No. 1. Article 14390. <https://doi.org/10.1038/ncomms14390>
32. Laplanche G., Kostka A., Horst O.M., Eggeler G., George E.P. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy // *Acta Materialia*. 2016. Vol. 118. P. 152–163. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.038>
33. Varvenne C., Luque A., Curtin W.A. Theory of strengthening in fcc high entropy alloys // *Acta Materialia*. 2016. Vol. 118. P. 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.040>
34. Shaysultanov D.G., Salishchev G.A., Ivanisenko Yu.V., Zhrebtsov S.V., Tikhonovsky M.A., Stepanov N.D. Novel Fe₃₆Mn₂₁Cr₁₈Ni₁₅Al₁₀ high entropy alloy with bcc/B2 dual-phase structure // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 705. P. 756–763. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.02.211>
35. Meyers M.A., Vöhringer O., Lubarda V.A. The onset of twinning in metals: A constitutive description // *Acta Materialia*. 2001. Vol. 49. No. 19. P. 4025–4039. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00300-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00300-7)
36. Zhu Y.T., Liao X.Z., Wu X.L. Deformation twinning in nanocrystalline materials // *Progress in Materials Science*. 2012. Vol. 57. No. 1. P. 1–62. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2011.05.001>
37. Senkov O.N., Semiatin S.L. Microstructure and properties of a refractory high-entropy alloy after cold working // *Journal of Alloys and Compounds*. 2015. Vol. 649. P. 1110–1123. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.07.209>
38. Juan Chien-Chang, Tseng Ko-Kai, Hsu Wei-Lin, Tsai Ming-Hung, Tsai Che-Wei, Lin Chun-Ming, Chen Swe-Kai, Lin Su-Jien, Yeh Jien-Wei. Solution strengthening of ductile refractory HfMo_xNbTaTiZr high-entropy alloys // *Materials Letters*. 2016. Vol. 175. P. 284–287. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.03.133>
39. Zamora R.J., Uberuaga B.P., Perez D., Voter A.F. The modern temperature-accelerated dynamics approach // *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. 2016. Vol. 7. P. 87–110. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-080615-033608>
40. Perez D., Uberuaga B.P., Voter A.F. The parallel replica dynamics method – coming of age // *Computational Materials Science*. 2015. Vol. 100. Part B. P. 90–103. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2014.12.011>
25. Yeh J.W. Physical metallurgy of high-entropy alloys. *JOM*. 2015, vol. 67, no. 10, pp. 2254–226. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1583-5>
26. Okamoto N.L., Fujimoto S., Kambara Y., Kawamura M., Zhenghao M.T.C., Matsunoshita H., Tanaka K., Inui H., George E.P. Size effect, critical resolved shear stress, stacking fault energy, and solid solution strengthening in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Scientific Reports*. 2016, vol. 6, article 35863. <https://doi.org/10.1038/srep35863>
27. Patriarca L., Ojha A., Sehitoglu H., Chumlyakov Y.I. Slip nucleation in single crystal FeNiCoCrMn high entropy alloy. *Scripta Materialia*. 2016, vol. 112, pp. 54–57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2015.09.009>
28. Kireeva I.V., Chumlyakov Yu.I., Pobedennaya Z.V., Kuksgausen I.V., Karaman I. Orientation dependence of twinning in single crystalline CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2017, vol. 705, pp. 176–181. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.08.065>
29. Wu Z., Gao Y.F., Bei H. Single crystal plastic behavior of a single-phase, face-center-cubic-structured, equiatomic FeNiCrCo alloy. *Scripta Materialia*. 2015, vol. 109, pp. 108–112. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2015.07.031>
30. Park J.M., Moon J., Bae J.W., Jang M.J., Park J., Lee S., Kim H.S. Strain rate effects of dynamic compressive deformation on mechanical properties and microstructure of CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2018, vol. 719, pp. 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.02.031>
31. Zhang Z., Sheng H., Wang Z., Gludovatz B., Zhang Z., George E.P., Yu Q., Mao S.X., Ritchie R.O. Dislocation mechanisms and 3D twin architectures generate exceptional strength-ductility-toughness combination in CrCoNi medium-entropy alloy. *Nature Communications*. 2017, vol. 8, no. 1, article 14390. <https://doi.org/10.1038/ncomms14390>
32. Laplanche G., Kostka A., Horst O.M., Eggeler G., George E.P. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2016, vol. 118, pp. 152–163. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.038>
33. Varvenne C., Luque A., Curtin W.A. Theory of strengthening in fcc high entropy alloys. *Acta Materialia*. 2016, vol. 118, pp. 164–176. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.040>
34. Shaysultanov D.G., Salishchev G.A., Ivanisenko Yu.V., Zhrebtsov S.V., Tikhonovsky M.A., Stepanov N.D. Novel Fe₃₆Mn₂₁Cr₁₈Ni₁₅Al₁₀ high entropy alloy with bcc/B2 dual-phase structure. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017, vol. 705, pp. 756–763. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.02.211>
35. Meyers M.A., Vöhringer O., Lubarda V.A. The onset of twinning in metals: A constitutive description. *Acta Materialia*. 2001, vol. 49, no. 19, pp. 4025–4039. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(01\)00300-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(01)00300-7)
36. Zhu Y.T., Liao X.Z., Wu X.L. Deformation twinning in nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*. 2012, vol. 57, no. 1, pp. 1–62. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2011.05.001>
37. Senkov O.N., Semiatin S.L. Microstructure and properties of a refractory high-entropy alloy after cold working. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015, vol. 649, pp. 1110–1123. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.07.209>
38. Juan Chien-Chang, Tseng Ko-Kai, Hsu Wei-Lin, Tsai Ming-Hung, Tsai Che-Wei, Lin Chun-Ming, Chen Swe-Kai, Lin Su-Jien, Yeh Jien-Wei. Solution strengthening of ductile refractory HfMo_xNbTaTiZr high-entropy alloys. *Materials Letters*. 2016, vol. 175, pp. 284–287. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.03.133>
39. Zamora R.J., Uberuaga B.P., Perez D., Voter A.F. The modern temperature-accelerated dynamics approach. *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. 2016, vol. 7, pp. 87–110. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-080615-033608>
40. Perez D., Uberuaga B.P., Voter A.F. The parallel replica dynamics method – coming of age. *Computational Materials Science*. 2015, vol. 100, part B, pp. 90–103. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2014.12.011>

41. Egami T., Guo W., Rack P.D., Nagase T. Irradiation resistance of multicomponent alloys // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2014. Vol. 45. P. 180–183. <https://doi.org/10.1007/s11661-013-1994-2>
42. Kuncel I., Polanski M., Bystrzycki J. Structure and hydrogen storage properties of a high entropy ZrTiVCrFeNi alloy synthesized using Laser Engineered Net Shaping (LENS) // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013. Vol. 38. No. 27. P. 12180–12189. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.05.071>
43. Kao Y.F., Chen S.K., Sheu J.H., Lin J.T., Lin W.E., Yeh J.W., Lin S.J., Lion T.H., Wang C.W. Hydrogen storage properties of multi-principal-component CoFeMnTi(x)V(y)Zr(z) alloys // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010. Vol. 35. No. 17. P. 9046–9059. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.06.012>
44. Firstov S.A., Gorban' V.F., Danilenko N.I., Karpets M.V., Andreiev A.A., Makarenko E.S. Thermal stability of superhard nitride coatings from high-entropy multicomponent Ti–V–Zr–Nb–Hf alloy // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2014. Vol. 52. P. 560–566. <https://doi.org/10.1007/s11106-014-9560-z>
45. Pogrebnjak A.D., Bagdasaryan A.A., Yakushchenko I.V., Beresnev V.M. The structure and properties of high-entropy alloys and nitride coatings based on them // *Russian Chemical Reviews*. 2014. Vol. 83. P. 1027–1061. <https://doi.org/10.1070/RCR4407>
46. Zaguliaev D., Gromov V., Rubannikova Y., Konovalov S., Ivanov Y., Romanov D., Semin A. Structure and phase states modification of AL-11SI-2CU alloy processed by ion-plasma jet and pulsed electron beam // *Surface and Coatings Technology*. 2020. Vol. 383. Article 125246. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125246>
47. Zhang C., Lv P., Xia H., Yang Z., Konovalov S., Chen X., Guan Q. The microstructure and properties of nanostructured Cr–Al alloying layer fabricated by high-current pulsed electron beam // *Vacuum*. 2019. Vol. 167. P. 263–270. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.06.022>
48. Konovalov S.V., Komissarova I.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Kosinov D.E. Structural and phase changes under electropulse treatment of fatigue-loaded titanium alloy VT1-0 // *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8. No. 1. P. 1300–1307. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.09.008>
49. Konovalov S., Ivanov Y., Gromov V., Panchenko I. Fatigue-induced evolution of AISI 310S steel microstructure after electron beam treatment // *Materials*. 2020. Vol. 13. No. 20. Article 4567. <https://doi.org/10.3390/ma13204567>
50. Romanov D., Moskovskii S., Konovalov S., Sosnin K., Gromov V., Ivanov Y. Improvement of copper alloy properties in electro-explosive spraying of ZnO–Ag coatings resistant to electrical erosion // *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8. No. 6. P. 5515–5523. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.019>
41. Egami T., Guo W., Rack P.D., Nagase T. Irradiation resistance of multicomponent alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2014, vol. 45, pp. 180–183. <https://doi.org/10.1007/s11661-013-1994-2>
42. Kuncel I., Polanski M., Bystrzycki J. Structure and hydrogen storage properties of a high entropy ZrTiVCrFeNi alloy synthesized using Laser Engineered Net Shaping (LENS). *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013, vol. 38, no. 27, pp. 12180–12189. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.05.071>
43. Kao Y.F., Chen S.K., Sheu J.H., Lin J.T., Lin W.E., Yeh J.W., Lin S.J., Lion T.H., Wang C.W. Hydrogen storage properties of multi-principal-component CoFeMnTi(x)V(y)Zr(z) alloys. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010, vol. 35, no. 17, pp. 9046–9059. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.06.012>
44. Firstov S.A., Gorban' V.F., Danilenko N.I., Karpets M.V., Andreiev A.A., Makarenko E.S. Thermal stability of superhard nitride coatings from high-entropy multicomponent Ti–V–Zr–Nb–Hf alloy. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2014, vol. 52, pp. 560–566. <https://doi.org/10.1007/s11106-014-9560-z>
45. Pogrebnjak A.D., Bagdasaryan A.A., Yakushchenko I.V., Beresnev V.M. The structure and properties of high-entropy alloys and nitride coatings based on them. *Russian Chemical Reviews*. 2014, vol. 83, pp. 1027–1061. <https://doi.org/10.1070/RCR4407>
46. Zaguliaev D., Gromov V., Rubannikova Y., Konovalov S., Ivanov Y., Romanov D., Semin A. Structure and phase states modification of AL-11SI-2CU alloy processed by ion-plasma jet and pulsed electron beam. *Surface and Coatings Technology*. 2020, vol. 383, article 125246. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125246>
47. Zhang C., Lv P., Xia H., Yang Z., Konovalov S., Chen X., Guan Q. The microstructure and properties of nanostructured Cr–Al alloying layer fabricated by high-current pulsed electron beam. *Vacuum*. 2019, vol. 167, pp. 263–270. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.06.022>
48. Konovalov S.V., Komissarova I.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Kosinov D.E. Structural and phase changes under electropulse treatment of fatigue-loaded titanium alloy VT1-0. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019, vol. 8, no. 1, pp. 1300–1307. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.09.008>
49. Konovalov S., Ivanov Y., Gromov V., Panchenko I. Fatigue-induced evolution of AISI 310S steel microstructure after electron beam treatment. *Materials*. 2020, vol. 13, no. 20, article 4567. <https://doi.org/10.3390/ma13204567>
50. Romanov D., Moskovskii S., Konovalov S., Sosnin K., Gromov V., Ivanov Y. Improvement of copper alloy properties in electro-explosive spraying of ZnO–Ag coatings resistant to electrical erosion. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019, vol. 8, no. 6, pp. 5515–5523. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.019>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

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

Kirill A. Osintsev, Postgraduate of the Chair of Metals Technology and Aviation Materials, Siberian State Industrial University, Samara National Research University **ORCID: 0000-0003-1150-6747**
E-mail: osincev.ka@ssau.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 V. Konovalov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Siberian State Industrial University; Head of the Chair of Metals Technology and Aviation Materials, Samara National Research University **ORCID: 0000-0003-4809-8660**
E-mail: ksv@ssau.ru

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

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

Ирина Алексеевна Панченко, к.т.н., доцент кафедры менеджмента качества и инноваций, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: i.ri.ss@yandex.ru

Ирина Алексеевна Панченко, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Quality Management and Innovation, Siberian State Industrial University
E-mail: i.ri.ss@yandex.ru

ВКЛАД АВТОРОВ:

К. А. Осинцев – проведение анализа источников информации по теме применения высокоэнтропийных сплавов. Редактирование финальной версии обзора.
В. Е. Громов – формирование концепции обзора. Анализ источников информации по теме монокристаллических высокоэнтропийных сплавов. Написание введения и выводов. Редактирование финальной версии обзора.
С. В. Коновалов – определение целей и задач обзора. Подбор и анализ источников информации по теме высокоэнтропийных сплавов с ОЦК и ГЦК кристаллическими решетками. Редактирование финальной версии обзора.
Ю. Ф. Иванов – подбор и анализ источников информации по теме механических свойств высокоэнтропийных сплавов, а также теории и модели описания механических свойств высокоэнтропийных сплавов. Редактирование финальной версии обзора.
И. А. Панченко – подбор и анализ источников информации по дислокационной и двойниковой пластичности высокоэнтропийных сплавов. Редактирование финальной версии обзора.

Поступила в редакцию 24.08.2020
 После доработки 20.09.2020
 Принята к публикации 11.12.2020

Received 24.08.2020
 Revised 20.09.2020
 Accepted 11.12.2020



Оригинальная статья

УДК 621.787:621.9.048

DOI 10.17073/0368-0797-2021-4-259-265



СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СТАЛИ 40Х, ПОДВЕРГНУТОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ С ДИНАМИЧЕСКИМ СИЛОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Н. Г. Дудкина, В. Н. Арисова

■ Волгоградский государственный технический университет (Россия, 400005, Волгоград, просп. им. Ленина, 28)

Аннотация. Приведены результаты комплексных исследований специфических особенностей структуры, микротвердости и глубины упрочненного поверхностного слоя стали 40Х, сформированного в результате электромеханической обработки с динамическим приложением деформирующего усилия (ЭМО с ударом). Исследования проведены методами оптической микроскопии, рентгеноструктурного анализа, определена микротвердость. Способ электромеханической обработки с динамическим силовым воздействием заключался в одновременном пропускании через зону контакта инструмента с деталью импульсов электрического тока и деформирующего усилия. В результате ударно-термического воздействия и тока плотностью 100, 300 и 600 А/мм² на поверхности стали в поперечном сечении формируются сегменты закаленного слоя разных размеров и с разным составом структур. Анализ структурных и фазовых превращений в поверхностном слое стали 40Х, подвергнутой динамической электромеханической обработке, свидетельствует о формировании специфической структуры белого слоя. Структура и свойства этого слоя близки к аморфному состоянию металла с максимальной твердостью HV 8,0 – 8,5 ГПа. По мере удаления от поверхности (за белым слоем) формируется переходная зона со структурой, не имеющей характерного для мартенсита игольчатого строения. Установлено, что с повышением плотности тока в ходе ударной электромеханической обработки увеличивается глубина упрочнения в 4 – 5 раз и одновременно повышается неоднородность прочностных свойств, микронапряжения увеличиваются на 25 %. Электромеханическое упрочнение с динамическим (ударным) приложением деформирующего усилия вызывает более глубокие превращения в структуре стали по сравнению с традиционной статической электромеханической обработкой с динамическим приложением деформирующего усилия. При электромеханической обработке с ударом увеличивается интенсивность температурно-силового воздействия на поверхностный слой стали, что позволяет управлять процессом формирования структуры и фазовых состояний стали 40Х.

Ключевые слова: электромеханическая обработка с ударом, плотность тока, сталь, структура, микротвердость, глубина упрочнения

Для цитирования: Дудкина Н.Г., Арисова В.Н. Структура и свойства поверхностного слоя стали 40Х, подвергнутой электромеханической обработке с динамическим силовым воздействием // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 4. С. 259–265.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-259-265>

Original article

SURFACE LAYER OF 40KH STEEL AFTER ELECTROMECHANICAL TREATMENT WITH DYNAMIC FORCE IMPACT

N. G. Dudkina, V. N. Arisova

■ Volgograd State Technical University (28 Lenina Ave., Volgograd 400005, Russian Federation)

Abstract. The paper presents the results of complex studies of the structure, microhardness and depth of the hardened surface layer of 40Kh steel formed as a result of electromechanical treatment with dynamic application of a deforming force (EMT with impact). The research was carried out using optical microscopy, X-ray diffraction analysis, and microhardness methods. The method of electromechanical treatment with dynamic force impact consisted in simultaneous transmission of electric current pulses and deforming force through the contact zone of the tool with the part. As a result of shock-thermal effects with different current densities ($j = 100 \text{ A/mm}^2$; 300 A/mm^2 ; 600 A/mm^2), segments of the hardened layer of different sizes and structure composition are formed on the steel surface in cross-section. Analysis of structural and phase transformations in the surface layer of 40Kh steel subjected to dynamic electromechanical treatment indicates the formation of a specific structure of the white layer, the structure and properties close to the amorphous state of the metal with a maximum hardness HV = 8.0 – 8.5 GPa. As you move away from the surface, a transition zone is formed behind the segment of the white layer with a structure that does not have the characteristic needle structure of martensite. It was found that with an increase in the current density during shock electromechanical treatment, the depth of hardening increases by 4 – 5 times with a simultaneous increase in the heterogeneity of strength properties; the level of micro-stresses increases by 25 %. Experimental data on the structural state, microhardness and depth of the surface layer of 40Kh steel show that electromechanical treatment with dynamic (shock) application of the deforming force causes deeper transformations in the steel structure compared to traditional static EMT.

The results obtained show that as a result of electro-mechanical processing with impact, the intensity of the temperature-force effect on the steel surface layer increases, which allows you to open the internal reserves of 40Kh steel and control the process of forming its structure and phase states.

Keywords: electromechanical treatment with impact, current density, steel, structure, microhardness, hardening depth

For citation: Dudkina N.G., Arisova V.N. Surface layer of 40Kh steel after electromechanical treatment with dynamic force impact. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 259–265. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-259-265>

ВВЕДЕНИЕ

Отечественный и зарубежный опыт показывает, что решение проблемы увеличения ресурса работы деталей машин связано с разработкой и внедрением технологических процессов, базирующихся на использовании концентрированных потоков энергии [1 – 7]. В высокоэнергетических методах поверхностного упрочнения используется импульсное приложение высокой удельной энергии на относительно малые объемы металла, что приводит к формированию специфических слоев, характеризующихся благоприятным сочетанием структуры, остаточных напряжений и физико-механических свойств [8 – 12]. На основе анализа и обобщения имеющихся в литературе исследований можно заключить о значительном влиянии высокопрочных структур на физико-механические и эксплуатационные характеристики упрочненных металлов [1 – 5, 13 – 15], несмотря на различия механизмов их возникновения.

Одним из эффективных технологических процессов формирования в поверхностных слоях сталей структуры специфических свойств (белый слой) является электромеханическая обработка с динамическим (ударным) деформированием (ЭМО с ударом). Такая обработка позволяет раскрыть потенциальные возможности широко распространенных средне- и высокоуглеродистых сталей к дополнительному упрочнению (росту твердости и глубины упрочнения) [16 – 18]. Комплекс высоких показателей механических свойств в поверхностных слоях, полученный импульсной ЭМО, обусловлен технологическими особенностями процесса: создание импульса высококонцентрированной энергии (тепла и деформации), связанные с этим тепловые эффекты в поверхностных слоях. Изменение способа подвода энергии в зону обработки сопровождается существенным повышением скорости тепловых и деформационных процессов по сравнению с известной традиционной статической ЭМО [4, 5]. Влияние скорости деформации резко сказывается на структуре и свойствах поверхностного слоя сталей при переходе от статического электромеханического поверхностного упрочнения к динамическому [18, 19].

Для традиционной статической ЭМО особенности структуры и твердости поверхностно упрочненного слоя исследованы достаточно полно, в области ЭМО с динамическим приложением усилия деформирования до сих пор ощущается нехватка научных работ, в которых подробно излагаются результаты исследования

тонкой структуры упрочненного поверхностного слоя. В связи с этим представляет интерес расширить как область исследований (металлографический, рентгено-структурный и электронно-микроскопический анализы, оценка микротвердости и др.), так и круг исследуемых металлов.

Целью настоящей работы является исследование влияния плотности тока электромеханической обработки с динамическим силовым воздействием (ЭМО с ударом) на специфические особенности структуры, микротвердость и глубину упрочненного поверхностного слоя стали 40Х.

МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводили на образцах круглого сечения diam. 25 мм толщиной 10 – 15 мм из стали 40Х после нормализации (феррито-перлитная структура). Образцы подвергали электромеханической обработке с высокоскоростным деформированием. Способ электромеханической обработки с динамическим силовым воздействием заключался в одновременном пропускании через зону контакта инструмента с деталью импульса электрического тока и импульса деформирующего усилия [16]. Ударное (импульсное) нагружение осуществляли на установке точечной сварки с регулятором цикла сварки РЦС-403У4. Величина усилия ударного деформирования P составляла 1500 Н без разрыва точки контакта электрод-инструмента с образцом. Плотность тока j варьировали по режимам 1 – 3: 100, 300 и 600 А/мм². Длительность импульса электрического тока устанавливали равной длительности ударного импульса: $\tau = 10^{-4}$ с. Обработка обеспечивает такое состояние, когда скорость подвода энергии превышает скорость ее распространения вследствие теплопроводности. Одновременное пропускание через зону контакта инструмента с деталью импульса тока и ударного силового импульса сопровождалось существенным повышением скорости тепловых и деформационных процессов по сравнению с традиционной электромеханической обработкой (обкаткой роликом). В результате ударной электромеханической обработки на поверхности материала формировалась специфическая структура «белый слой».

После обработки образцы разрезали, изготавливали поперечные микрошлифы для изучения микроструктуры, измерения микротвердости и проведения рентгено-структурного анализа (РСА).

Металлографические исследования проводили с помощью оптической микроскопии («Olympus BX-61», № 2 M1 0681) с программным обеспечением AnalySis GmbH. Микроструктуру фотографировали при увеличении 50, 100, 200, 500 крат.

Рентгеноструктурный анализ проводили на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 ADVANCE ECO. Для анализа дифрактограмм и расшифровки фазового состава применяли программное обеспечение к дифрактометру Diffrac.EVA (version 4.2.1) с использованием лицензионной базы данных Powder Diffraction File-2 (The International Center for Diffraction Data).

Расчет величины микронапряжений и размеров областей когерентного рассеяния (ОКР) проводили по методу аппроксимации [20], регистрировали отражения (110) и (220) α -фазы стали.

Измерения микротвердости по локальным объемам поверхностного слоя проводили на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 0,5 и 1 Н. Расстояние между отпечатками составляло 30 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изображения микроструктур в поверхностном слое стали 40X, подвергнутой импульсной ЭМО с плотностью тока 100, 300, 600 А/мм², представлены на рис. 1. Условия возникновения и свойства рассматриваемых структур имеют общность механизма их образования: возникают при одновременном сверхбыстром нагреве и деформировании. Интенсивность нагрева стали за счет тепла трансформирующейся электрической энергии определяется плотностью тока в зоне контакта электрод-инструмента с образцом. Металлографический анализ показал, что после импульсного воздействия при всех исследуемых режимах плотности тока j на поверхности стали в поперечном сечении формируются сегменты с параболическим профилем закаленной зоны, типичные для ЭМО. За счет пластической деформации разогретого с разной температурой поверхностного слоя образца формируются сегменты закаленного слоя разных размеров и составом структур. При движении от поверхности в глубь металла последовательно располагаются закаленная зона, переходная зона и исходная структура.

Установлено, что все исследованные образцы в поверхности имеют мелкозернистую неоднородную по толщине сегмента мартенситную структуру. Исследование структурного состояния и характеристик присутствующих фаз образцов, обработанных по режиму с плотностью тока 100 А/мм² (рис. 1, а, б), показало отсутствие белого слоя в поверхности (в редких случаях наблюдается формирование белого слоя чрезвычайно малой толщины). Это, видимо, объясняется тем, что не преодолен энергетический барьер образования белого слоя [1] при данном режиме (несмотря на то, что легирование стали хромом благоприятно влияет на фор-

мирование белых слоев). Структура сегмента состоит из мартенсита, не имеющего характерного игольчатого строения, без сохранения внутризеренной текстуры нормализованной стали 40X и рисунка ферритной сетки по границам зерен. Сегмент имеет деформированные зоны, вытянутые в направлении удара. В небольшой переходной зоне от упрочненного слоя к исходной структуре (рис. 1, б) наблюдается частичное сохранение характерного рисунка перлитных и ферритных участков, а также рисунка ферритной сетки по границам зерен. Максимальная микротвердость HV в сегменте составляет 6,0 ГПа. Оценка неоднородности микротвердости ($\Delta HV = HV_{\max} - HV_{\min}$) в упрочненном фрагменте показала разброс твердости порядка $\Delta HV = 1,5$ ГПа.

Анализ структурных и фазовых превращений в поверхностном слое стали 40X, подвергнутой динамической ЭМО с плотностью тока 300 А/мм² (рис. 1, в), свидетельствует о формировании белого слоя, который выглядит как сплошное, однородное светлое поле (по структуре и свойствам приближается, скорее, к аморфному состоянию металла) с максимальной твердостью HV 8,0 – 8,5 ГПа. По мере удаления от поверхности за сегментом белого слоя формируется переходная зона (рис. 1, з) со структурой, не имеющей характерного для мартенсита игольчатого строения с твердостью HV

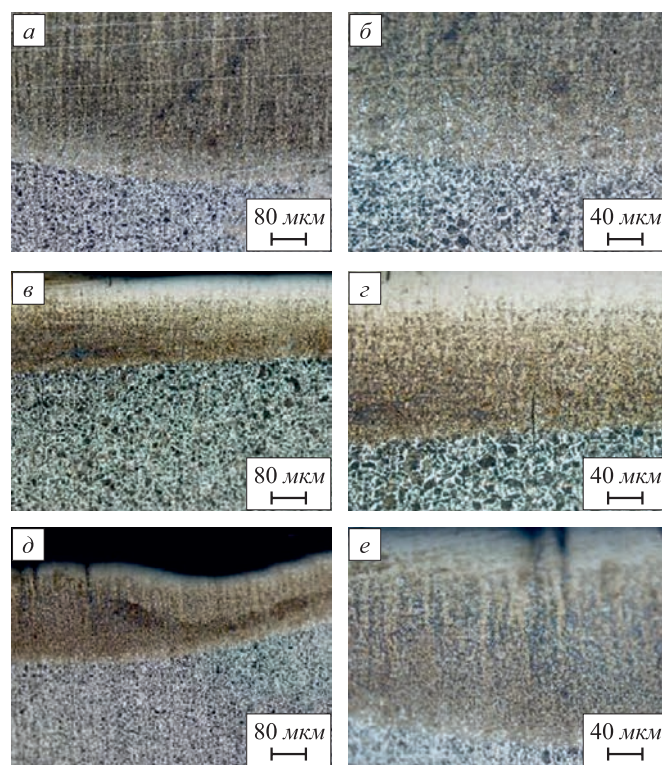


Рис. 1. Структура поверхностного слоя стали 40X, упрочненной ЭМО с импульсным приложением деформирующего усилия: а, б – $j = 100$ А/мм²; в, з – $j = 300$ А/мм²; д, е – $j = 600$ А/мм²

Fig. 1. Structure of the surface layer of 40Kh steel, hardened by EMT with a pulse application of the deforming force: а, б – $j = 100$ А/мм²; в, з – $j = 300$ А/мм²; д, е – $j = 600$ А/мм²

5,5 – 6,5 ГПа, и последующей зоной, в которой наблюдается резкое измельчение зерен по сравнению с исходной нормализованной сталью 40X, с менее выраженной деформацией в направлении удара, чем по режиму 1. Неоднородность микротвердости в переходной зоне сегмента достигает $\Delta HV = 1,0$ ГПа.

На рис. 1, д представлена структура фрагмента упрочненного слоя после импульсной обработки с плотностью 600 А/мм². Структура сегмента сочетает в себе структуры, полученные по режимам 1 и 2: формируется зона белого слоя с твердостью HV 7,0 – 8,0 ГПа, за которым наблюдается зона повышенной твердости HV 4,0 – 6,5 ГПа с перекристаллизованными зернами, представляющими мартенсит со значительными следами деформации. Картина структуры (рис. 1, е) свидетельствует о большой концентрационной неоднородности мартенсита, о чем свидетельствует и разброс твердости в упрочненном сегменте ($\Delta HV = 2,5$ ГПа).

Неоднородность твердости в сегменте, очевидно, связана, с одной стороны, с большой неоднородностью мартенсита, образовавшегося из неоднородного аустенита сверхбыстрой закалки, с другой стороны, – с неравномерной пластической деформацией мартенсита, вызванной высокоскоростной деформацией металла при динамическом ударе.

Металлографические исследования показали, что, несмотря на общность механизма образования структур (все возникает при сверхбыстром нагреве и деформировании), свойства рассматриваемых структур имеют существенные различия. В упрочненных при разных режимах нагрева поверхностных слоях стали происходит множество процессов термомеханического и диффузионного характера, которые обуславливают различия в протекании процессов фазовых и структурных изменений. После импульсного воздействия с различной тепловой энергией с повышением тепловыделения и усилением явлений последствия теплового источника увеличивается размер отпечатка, форма сегмента и изменяется состав его структур. Таким образом, тип структуры, формируемой в процессе высокоскоростной деформации ЭМО с ударом, определяется взаимодействием и соотношением температуры нагрева (в том числе температурой деформации) и величиной динамической нагрузки.

На рис. 2 представлено изменение толщины упрочненного сегмента (белый слой и переходная зона) от изменения плотности тока импульсной обработки. С увеличением плотности тока глубина упрочненного слоя возрастает. Так, при $j = 100$ А/мм² толщина упрочненного слоя h составляет 0,33 – 0,38 мм; при плотности тока 300 и 600 А/мм² толщина упрочненного слоя составляет 0,48 – 0,54 и 1,2 – 1,4 мм соответственно, а в некоторых случаях достигает 2 мм.

С целью установления природы возникающей в зоне упрочнения структуры стали проводили рентгенографический анализ структуры поверхностного слоя стали

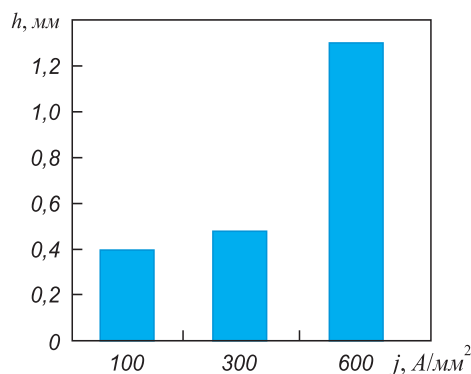


Рис. 2. Изменение толщины упрочненного сегмента (белый слой и переходная зона) от плотности тока импульсной электрохимической обработки

Fig. 2. Change in thickness of the hardened segment (white layer and transition zone) from the current density j of pulse electromechanical processing

40X, упрочненной импульсной ЭМО. В качестве эталона использовали образец в отожженном состоянии. Вид дифрактограмм и отражений 110 и 220 α -фазы при исследованных режимах электрохимической обработки с динамическим силовым воздействием представлен на рис. 3. Результаты сравнительного рентгеноструктурного анализа образцов стали 40X (где D – размер ОКР; $\Delta a/a$ – относительная деформация решетки; σ_{II} – напряжения второго рода) приведены в таблице.

Как следует из таблицы ОКР, блоки мозаики очень мелкие и с увеличением плотности тока при ЭМО происходит их измельчение от 304 до 224 Å, при этом уровень микронапряжений увеличивается от 238 МПа (режим 1) до 377 МПа (режим 3).

Проведенный рентгенофазовый анализ структуры упрочненного поверхностного слоя стали 40X показывает, что при режимах 1, 2 все линии дифрактограммы принадлежат α -фазе мартенсита. А при обработке по режиму 3 кроме α -фазы присутствует около 20 % аустенита, количество которого определяли сравнением интегральных интенсивностей интерференционных линий, принадлежащих аустенитной и мартенситной фазам (по методу градуировочной кривой) [20]. Аустенит может образоваться в результате неравновесной кристаллизации, которую обеспечивают быстро протекающие процессы при деформации с высоким вложением энергии при высокой плотности тока ЭМО. Напряжения второго рода при этом режиме достигают 377 МПа (см. таблицу).

Таким образом, импульсный нагрев, создающий высокий температурный градиент и значительное удельное давление, вызывающее деформирование с большими скоростями и градиентами напряжений, приводят к мелкозернистости и неоднородности структуры и, как следствие, к получению более высоких показателей механических свойств в поверхностных слоях. Повышение скорости деформации сокращает время действия

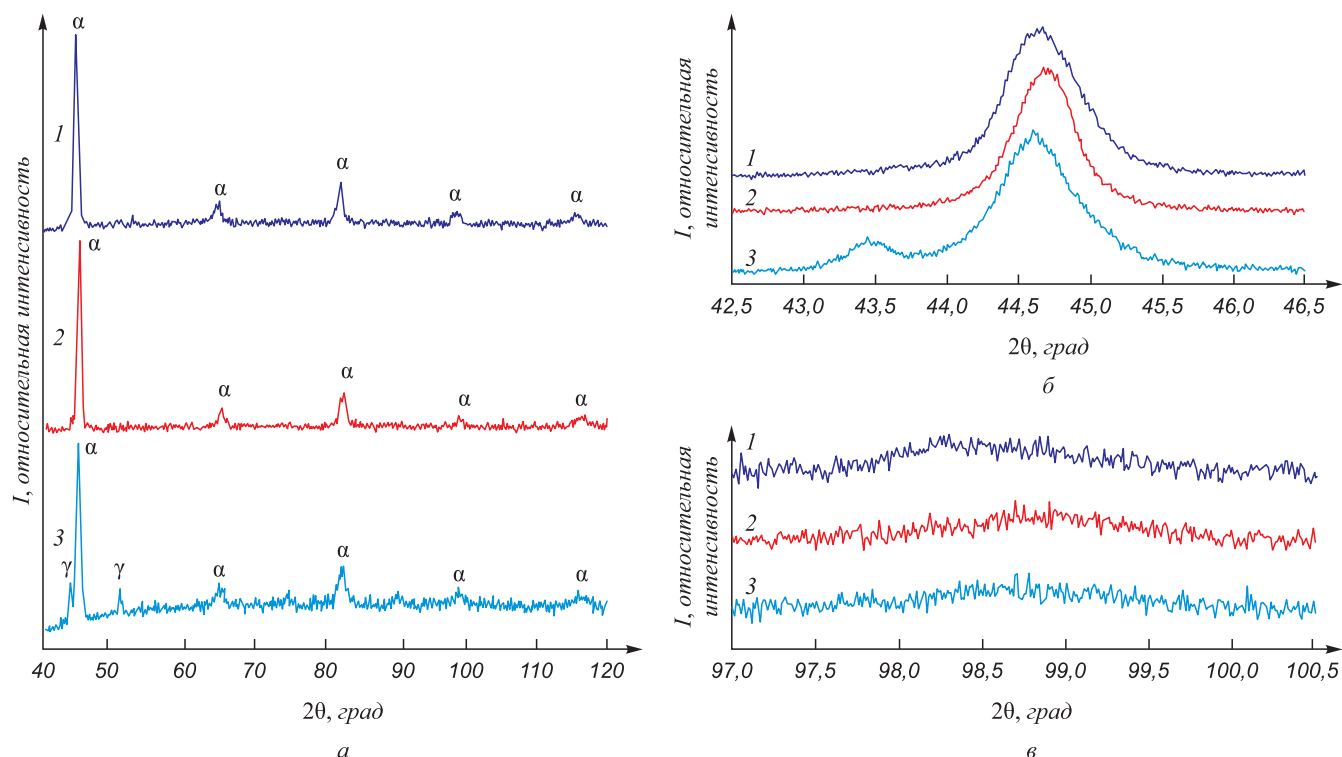


Рис. 3. Дифрактограммы исследуемых образцов:
а – общий вид; б, в – отражения 110 и 220 α-фазы; 1 – 3 – плотность тока 100, 300 и 600 А/мм²

Fig. 3. Diffractograms of the studied samples:
а – general view; б, в – reflections of 110 and 220 α-phases, respectively; 1 – 3 – current density of 100, 300, and 600 A/mm², respectively

Размер ОКР и величина микронапряжений в исследуемых образцах

Size of the coherent-scattering region and magnitude of microstresses in the studied samples

Режим	$D, \text{\AA}$	$\Delta a/a$	$\sigma_{II}, \text{МПа}$
1	304	0,0012	238
2	224	0,0014	283
3	228	0,0019	377

деформирующих напряжений и приводит при неизменном давлении к повышению величины деформирующих напряжений и увеличению интенсивности развития дефектов кристаллического строения, что вызывает дополнительное упрочнение поверхностного слоя. Деформируемое и напряженное состояние металла после ударно-термической обработки определяется не только внешними (контактное давление электрод-инструмента на обрабатываемый образец), но и внутренними (термоупругие, структурные, фазовые напряжения и дефор-

мации) факторами, что влияет на аустенитно-мартенситное превращение и необычное изменение свойств в поверхностном слое стали.

Выводы

Тип структуры, формируемой на стали 40Х в процессе ударной электромеханической обработки, определяется взаимодействием и соотношением температуры нагрева и величины динамической нагрузки обработки.

Увеличение плотности тока при ЭМО с динамическим силовым воздействием приводит к значительному увеличению глубины упрочнения (1,5 – 2,0 мм) и повышению максимальной твердости в микрообъемах до 8,0 – 8,5 ГПа в поверхностном слое стали 40Х.

Полученные результаты показывают, что динамическая электромеханическая обработка обладает высокими потенциальными возможностями в управлении основными структурными изменениями в поверхностном слое стали при формировании физико-механических свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Бабей Ю.И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. Киев: Наукова думка, 1988. 238 с.
2. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 301 с.
1. Babei Yu.I. *Physical Foundations of Pulsed Hardening of Steel and Cast Iron*. Kiev: Naukova dumka, 1988, 238 p. (In Russ.).
2. Grigor'yants A.G. *Fundamentals of Materials Laser Processing*. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 301 p. (In Russ.).

3. Gnanamuthu D.S. Laser surface treatment // *Optical Engineering*. 1980. Vol. 19. No. 5. P. 783–792. <http://doi.org/10.1117/12.7972604>
4. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой. М.: Машиностроение, 1989. 200 с.
5. Багмутов В.П., Паршев С.Н., Дудкина Н.Г., Захаров И.Н. Электро-механическая обработка: технологические и физические основы, свойства, реализация. Новосибирск: Наука, 2003. 318 с.
6. Bathula S., Anandani R.C., Dhar A., Srivastava A.K. Microstruc-tural features and mechanical properties of Al 5083/SiCp metal matrix nanocomposites produced by high energy ball milling and spark plasma sintering // *Material Science and Engineering: A*. 2012. Vol. 545. P. 97–102. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.02.095>
7. Janicki D. Microstructural evolution during laser surface alloying of ductile cast iron with titanium // *Archives of Metallurgy and Mate-rials*. 2017. Vol. 62. No. 4. P. 2425–2431. <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0357>
8. Lesyk D.A., Martinez S., Mordiyuk B.N., Dzhemelinskiy V.V., Lamikiz A., Prokopenko G.I. Effects of laser heat treatment com-bined with ultrasonic impact treatment on the surface topography and hardness of carbon steel AISI 1045 // *Optics and Laser Techno-logy*. 2019. Vol. 111. P. 424–438. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.09.030>
9. Бровер А.В., Бровер Г.И. Влияние постоянного магнитного поля на структурообразование в сталях при скоростной лазерной обра-ботке // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018. Т. 61. № 8. С. 638–643. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-8-638-643>
10. Ivannikov A.Yu., Kalita V.I., Komlev D.I., Radyuk A.A., Bag-mutov V.P., Zakharov I.N., Parshev S.N. The effect of electromechanical treatment on structure and properties of plasma sprayed Ni-20Cr coating // *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. Vol. 655. P. 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.125>
11. Gill A.S., Telang A., Ye C., Mannava S.R., Qian D., Vasudevan V.K. Localized plastic deformation and hardening in laser shock peened Inconel alloy 718 SPF // *Materials Characterization*. 2018. Vol. 142. P. 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.05.010>
12. Fogagnolo J.B., Rodrigues A.V., Sallica-Leva E., Lima M.S.-L., Ca-ram R. Surface stiffness gradient in Ti parts obtained by laser surface alloying with Cu and Nb // *Surface and Coatings Technology*. 2016. Vol. 297. P. 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.04.025>
13. Biswas A., Li L., Chatterjee U.K., Manna I., Pabi S.K., Majum-dar J.D. Mechanical and electrochemical properties of laser surface nitrided Ti–6Al–4V // *Scripta Materialia*. 2008. Vol. 59. No. 2. P. 239–242. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.03.020>
14. Guo W., Dong S., Guo W., Francis J.A., Li L. Microstructure and mechanical characteristics of a laser welded joint in SA508 nuclear pressure vessel steel // *Materials Science and Engineering: A*. 2015. Vol. 625. P. 65–80. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.11.056>
15. Zou J.X., Zhang K.M., Hao S.Z., Dong C., Grosdidier T. Mecha-nisms of hardening, wear and corrosion improvement of 316 L stain-less steel by low energy high current pulsed electron beam surface treatment // *Thin Solid Films*. 2010. Vol. 519. No. 4. P. 1404–1415. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2010.09.022>
16. Пат. 2168552 РФ. Способ обработки деталей поверхностным пластическим деформированием / Дудкина Н.Г., Федоров А.В., Свитачев С.Ю.; заявл. 10.01.2000; опубл. 10.06.2001. Бюл. № 16.
17. Эдигаров В.Р., Литав Е.В., Малий В.В. Комбинированная элект-ромеханическая обработка с динамическим силовым воздейст-вием // *Омский научный вестник*. 2015. № 1 (137). С. 69–73.
18. Матлин М.М., Дудкина Н.Г., Дудкин А.Д. Особенности форм-ирования упрочненного слоя при электромеханической обра-ботке с динамическим силовым воздействием // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2007. № 6 (30). С. 39–40.
19. Дудкина Н.Г. Исследование поверхностного слоя стали У10, подвергнутой электромеханической обработке с динамическим силовым воздействием // *Известия ВолгГТУ*. 2017. № 6 (201). С. 148–153.
20. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографичес-кий и электронно-оптический анализ. М.: МИСИС, 2002. 360 с.
3. Gnanamuthu D.S. Laser surface treatment. *Optical Engineering*. 1980, vol. 19, no. 5, pp. 783–792. <http://doi.org/10.1117/12.7972604>
4. Askinazi B.M. *Hardening and Restoration of Machine Parts by Electromechanical Processing*. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 200 p. (In Russ.).
5. Bagmutov V.P., Parshev S.N., Dudkina N.G., Zakharov I.N. *Electro-mechanical Processing: Technological and Physical Foundations, Pro-perties, Implementation*. Novosibirsk: Nauka, 2003, 318 p. (In Russ.).
6. Bathula S., Anandani R.C., Dhar A., Srivastava A.K. Microstruc-tural features and mechanical properties of Al 5083/SiCp metal matrix nanocomposites produced by high energy ball milling and spark plasma sintering. *Material Science and Engineering: A*. 2012, vol. 545, pp. 97–102. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.02.095>
7. Janicki D. Microstructural evolution during laser surface alloying of ductile cast iron with titanium. *Archives of Metallurgy and Mate-rials*. 2017, vol. 62, no. 4, pp. 2425–2431. <https://doi.org/10.1515/amm-2017-0357>
8. Lesyk D.A., Martinez S., Mordiyuk B.N., Dzhemelinskiy V.V., Lamikiz A., Prokopenko G.I. Effects of laser heat treatment com-bined with ultrasonic impact treatment on the surface topography and hardness of carbon steel AISI 1045. *Optics and Laser Techno-logy*. 2019, vol. 111, pp. 424–438. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.09.030>
9. Brover A.V., Brover G.I. Influence of constant magnetic field on structure formation in steels at high-speed laser processing. *Izves-tiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 8, pp. 638–643. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-8-638-643>
10. Ivannikov A.Yu., Kalita V.I., Komlev D.I., Radyuk A.A., Bag-mutov V.P., Zakharov I.N., Parshev S.N. The effect of electromechanical treatment on structure and properties of plasma sprayed Ni-20Cr coating. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016, vol. 655, pp. 11–20. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.09.125>
11. Gill A.S., Telang A., Ye C., Mannava S.R., Qian D., Vasudevan V.K. Localized plastic deformation and hardening in laser shock peened Inconel alloy 718 SPF. *Materials Characterization*. 2018, vol. 142, pp. 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.05.010>
12. Fogagnolo J.B., Rodrigues A.V., Sallica-Leva E., Lima M.S.-L., Ca-ram R. Surface stiffness gradient in Ti parts obtained by laser surface alloying with Cu and Nb. *Surface and Coatings Technology*. 2016, vol. 297, pp. 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.04.025>
13. Biswas A., Li L., Chatterjee U.K., Manna I., Pabi S.K., Majum-dar J.D. Mechanical and electrochemical properties of laser surface nitrided Ti–6Al–4V. *Scripta Materialia*. 2008, vol. 59, no. 2, pp. 239–242. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.03.020>
14. Guo W., Dong S., Guo W., Francis J.A., Li L. Microstructure and mechanical characteristics of a laser welded joint in SA508 nuclear pressure vessel steel. *Materials Science and Engineering: A*. 2015, vol. 625, pp. 65–80. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.11.056>
15. Zou J.X., Zhang K.M., Hao S.Z., Dong C., Grosdidier T. Mecha-nisms of hardening, wear and corrosion improvement of 316 L stain-less steel by low energy high current pulsed electron beam surface treatment. *Thin Solid Films*. 2010, vol. 519, no. 4, pp. 1404–1415. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2010.09.022>
16. Dudkina N.G., Fedorov A.V., Svitachev S.Yu. *The method of parts processing by surface plastic deformation*. Patent RF no. 2168552. *Byulleten' izobretenii*. 2001, no. 16. (In Russ.).
17. Edigarov V.R., Litau E.V., Malyi V.V. Combined electromechanical processing with dynamic impact. *Omskii nauchnyi vestnik*. 2015, no. 1 (137), pp. 69–73. (In Russ.).
18. Matlin M.M., Dudkina N.G., Dudkin A.D. Hardened layer forma-tion during electromechanical processing with dynamic impact. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2007, no. 6 (30), pp. 39–40. (In Russ.).
19. Dudkina N.G. Surface layer of U10 steel after electromechanical processing with dynamic force impact. *Izvestiya VolgGTU*. 2017, no. 6 (201), pp. 148–153. (In Russ.).
20. Gorelik S.S., Skakov Yu.A., Rastorguev L.N. *X-ray and Electron Optical Analysis*. Moscow: MISIS, 2002, 360 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Наталья Геннадьевна Дудкина, к.т.н., доцент кафедры «Детали машин и подъемно-транспортные устройства», Волгоградский государственный технический университет

ORCID: 0000-0002-1502-7025

E-mail: 4dng@mail.ru

Вера Николаевна Арисова, к.т.н., доцент кафедры «Материаловедение и композиционные материалы», Волгоградский государственный технический университет

ORCID: 0000-0001-6787-6689

E-mail: Arisova1954@mail.ru

Natal'ya G. Dudkina, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Machine Parts and Lifting-Transport Machines", Volgograd State Technical University

ORCID: 0000-0002-1502-7025

E-mail: 4dng@mail.ru

Vera N. Arisova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Materials Science and Composite Materials", Volgograd State Technical University

ORCID: 0000-0001-6787-6689

E-mail: Arisova1954@mail.ru

Поступила в редакцию 06.03.2020

После доработки 10.04.2020

Принята к публикации 13.04.2020

Received 06.03.2020

Revised 10.04.2020

Accepted 13.04.2020



Оригинальная статья

УДК 669.14

DOI 10.17073/0368-0797-2021-4-266-272



ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ И СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ. СООБЩЕНИЕ 2. ИЗОТЕРМИЧЕСКАЯ ДИАГРАММА КИНЕТИКИ РАСПАДА ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО АУСТЕНИТА РЕЛЬСОВОЙ СТАЛИ R350LHT

Е. В. Полевой¹, Ю. Н. Симонов², Н. А. Козырев³,
Р. А. Шевченко³, Л. П. Башенко³

¹ АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (Россия, 654043, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, шоссе Космическое, 16)

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь, 614990, Комсомольский проспект, 29)

³ Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. По результатам проведенных dilatометрических, металлографических и дюрOMETрических исследований процесса распада переохлажденного аустенита стали R350LHT при непрерывном охлаждении и в изотермических условиях была построена изотермическая диаграмма распада переохлажденного аустенита исследуемой стали. При сравнении термокинетической и изотермической диаграмм распада переохлажденного аустенита стали R350LHT установлено, что термокинетическая диаграмма, построенная при непрерывном охлаждении, смещается вниз и вправо по сравнению с изотермической диаграммой. Данный результат полностью согласуется с известными закономерностями. Во время исследований были определены критические точки стали R350LHT: $A_{c1} = 711\text{ }^{\circ}\text{C}$; $M_n = 196\text{ }^{\circ}\text{C}$. По изотермической диаграмме распада переохлажденного аустенита стали R350LHT определена температура минимальной устойчивости переохлажденного аустенита, которая составила $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. В изотермических условиях структуры перлитного типа реализуются в интервале температур от 700 до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. При $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ формируется смесь структур перлитного и бейнитного типов. В интервале температур от 500 до $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ формируются бейнитные структуры: при $500 - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ образуется верхний бейнит; при $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ – смесь верхнего и нижнего бейнита; при $300 - 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ – нижний бейнит. Практически во всем изученном температурном интервале изотермического распада переохлажденного аустенита наблюдается увеличение твердости продуктов превращения при понижении температуры выдержки от 246 HV (при $700\text{ }^{\circ}\text{C}$) до 689 HV (при $250\text{ }^{\circ}\text{C}$). Однако при температуре $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит небольшое падение твердости, что, по-видимому, вызвано появлением остаточного аустенита при развитии бейнитного превращения.

Ключевые слова: рельсовая сталь, аустенит, феррит, перлит, распад переохлажденного аустенита, непрерывное охлаждение, изотермические условия

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

Для цитирования: Полевой Е.В., Симонов Ю.Н., Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Башенко Л.П. Исследование фазовых и структурных превращений при формировании сварного соединения из рельсовой стали. Сообщение 2. Изотермическая диаграмма распада переохлажденного аустенита рельсовой стали R350LHT // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 4. С. 266–272.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-266-272>

Original article

PHASE AND STRUCTURAL TRANSFORMATIONS WHEN FORMING A WELDED JOINT FROM RAIL STEEL. REPORT 2. ISOTHERMAL DIAGRAM OF DECOMPOSITION OF SUPERCOOLED AUSTENITE OF R350LHT RAIL STEEL

E. V. Polevoi¹, Yu. N. Simonov², N. A. Kozyrev³,
R. A. Shevchenko³, L. P. Bashchenko³

¹ JSC “EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant” (16 Kosmicheskoe Route, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654043, Russian Federation)

² Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskii Ave., Perm 614990, Russian Federation)

³ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

Abstract. An isothermal diagram of decomposition of supercooled austenite of R350LHT steel was constructed based on the results of dilatometric, metallographic and hardness analysis of this decomposition during continuous cooling and under isothermal conditions. When comparing the thermokinetic and isothermal diagrams, it was found that the thermokinetic diagram plotted during continuous cooling shifts downward and to the right in comparison with the isothermal diagram. This result is fully consistent with the known regularities. During the research, the critical points of R350LHT steel were determined: $A_{c1} = 711\text{ }^{\circ}\text{C}$; $M_n = 196\text{ }^{\circ}\text{C}$. This isothermal diagram was used to determine the temperature of the minimum stability of overcooled austenite, which was $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Under isothermal conditions, pearlite-type structures appear in the temperature range from 700 to $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. At $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, a mixture of pearlitic and bainitic structures is formed. In the temperature range from 500 to $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, bainitic structures are formed: at $500 - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ – upper bainite; at $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ – a mixture of upper and lower bainite; at $300 - 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ – lower bainite. Almost in the entire studied temperature range of overcooled austenite isothermal decomposition, an increase in the hardness of the transformation products is observed with a decrease in the holding temperature from 246 HV (at $700\text{ }^{\circ}\text{C}$) to 689 HV (at $250\text{ }^{\circ}\text{C}$). However, at a temperature of $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, a slight drop in hardness occurs, which is apparently caused by the appearance of retained austenite during the development of bainitic transformation.

Keywords: rail steel, austenite, ferrite, pearlite, supercooled austenite, decomposition, continuous cooling, isothermal conditions

Funding: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) and the Kemerovo Region in the framework of scientific project No. 20-48-420003 p_a “Development of physicochemical and technological fundamentals of creation of essentially new welding method for differentially heat-strengthened rails”.

For citation: Polevoi E.V., Simonov Yu.N., Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Bashchenko L.P. Phase and structural transformations when forming a welded joint from rail steel. Report 2. Isothermal diagram of decomposition of supercooled austenite of R350LHT rail steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 266–272. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-266-272>

ВВЕДЕНИЕ

Технический процесс в области обработки металлов давлением, сварки, термической обработки, автоматизация и улучшение технологических процессов требуют достаточно полного и детального представления об основных характеристиках и особенностях обрабатываемых сплавов. Помимо химического состава к числу таких характеристик относятся данные о положении критических точек и кинетике распада переохлажденного аустенита, о чувствительности стали к перегреву и росту зерна, о прокаливаемости и механических свойствах сталей [1]. Кинетику распада аустенита при постоянной температуре переохлаждения характеризуют изотермические диаграммы. Такие диаграммы наглядны для сравнительной оценки разных сталей, а также для выявления влияния легирования и других факторов (температуры нагрева, размера зерна, пластической деформации и т.п.) на кинетику распада переохлажденного аустенита. Термокинетические диаграммы характеризуют кинетику распада аустенита при непрерывном охлаждении. Эти диаграммы менее наглядны, но они имеют большое практическое значение, так как при термической обработке распад аустенита происходит при непрерывном изменении температуры, а не в изотермических условиях. Если известны скорости охлаждения в разных сечениях реальных изделий, то, нанося соответствующие кривые скоростей охлаждения на термокинетическую диаграмму, можно определить температуру превращений аустенита и оценить получаемую при этом структуру [2]. Кинетика превращений аустенита (то есть вид диаграммы распада) зависит от множества факторов и прежде всего от химического состава аустенита. Поэтому температурные условия развития того или иного превращения могут меняться в весьма широких пределах [3 – 6].

В процессе сварки железнодорожных рельсов неизбежно образуется зона термического влияния в резуль-

тате локального нагрева, что приводит к образованию различных структур в сварном соединении [7 – 10]. При разработке технологий сварки ответственных металлоконструкций [11 – 15] с целью получения наиболее полного представления о возможных структурных состояниях стали, которые можно реализовать в результате распада переохлажденного аустенита в различных температурных интервалах, строят изотермические диаграммы распада переохлажденного аустенита [16 – 19].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

По методике и на приборной базе, рассмотренной в работе [20], для построения изотермической диаграммы распада переохлажденного аустенита проводили dilatометрические исследования превращения аустенита при изотермических выдержках. Dilatометрический анализ проводили на закалочном dilatометре Linseis RITA L78 с горизонтальным расположением образцов. Микродюрометрический анализ проводили в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1 – 2007 на автоматическом микротвердометре DuraScan 70 фирмы EMCO-TEST (Австрия) для проведения испытаний по Виккерсу по методу восстановленного отпечатка вдавливанием четырехгранной алмазной пирамиды с квадратным основанием при нагрузке 500 г . Metallografические исследования проводили на микрошлифах образцов стали R350LHT с использованием светового инвертированного микроскопа Olympus GX 51 при увеличении $500\times$. Обработку изображений проводили с применением программно-аппаратного комплекса анализа изображений SIAMS 700, а также при помощи программного обеспечения Olympus Stream Motion, версия 1.8.

Нагрев для последующего изучения распада переохлажденного аустенита при изотермических выдержках проводили со скоростью $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$ до температуры $825\text{ }^{\circ}\text{C}$. Выдержка при температуре аустенитизации со-

ставляла 15 мин. До температуры изотермической выдержки охлаждение проводили со скоростью 100 °C/с. Изотермическую выдержку осуществляли при температурах 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300 и 250 °C.

Время начала и окончания превращения при изотермической выдержке определяли по точке отрыва касательной от линейного участка дилатограммы до и после фазового превращения.

На образцах после дилатометрических измерений по различным режимам изотермической обработки по заданным режимам были изготовлены микрошлифы и исследована микроструктура, а также проведен микродюрометрический анализ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

По результатам исследования была построена изотермическая диаграмма распада переохлажденного аустенита стали R350LHT (рис. 1).

В интервале температур 700 – 600 °C распад переохлажденного аустенита проходит по перлитному

механизму. Образуются структуры перлитного типа, которые состоят из колоний феррито-цементитной смеси. При температуре 700 °C образуется перлит (рис. 2, а), при температуре 650 °C – сорбит (рис. 2, б), при температуре 600 °C – троостит (рис. 2, в). При увеличении дисперсности феррито-карбидной смеси происходит увеличение твердости стали R350LHT. Твердость полученного перлита составляет 246 HV, твердость сорбита и троостита – 315 HV и 367 HV соответственно.

При температуре 550 °C распад переохлажденного аустенита приводит к развитию превращения по перлитному и бейнитному механизмам. При этом формируется смесь троостита и бейнита (рис. 2, г) с твердостью 380 HV.

В интервале температур 500 – 400 °C формируется структура верхнего бейнита, в которой присутствуют, по-видимому, достаточно крупные островки остаточного аустенита неправильной округлой формы (рис. 2, д – ж). Твердость при этом возрастает от 340 до 428 HV.

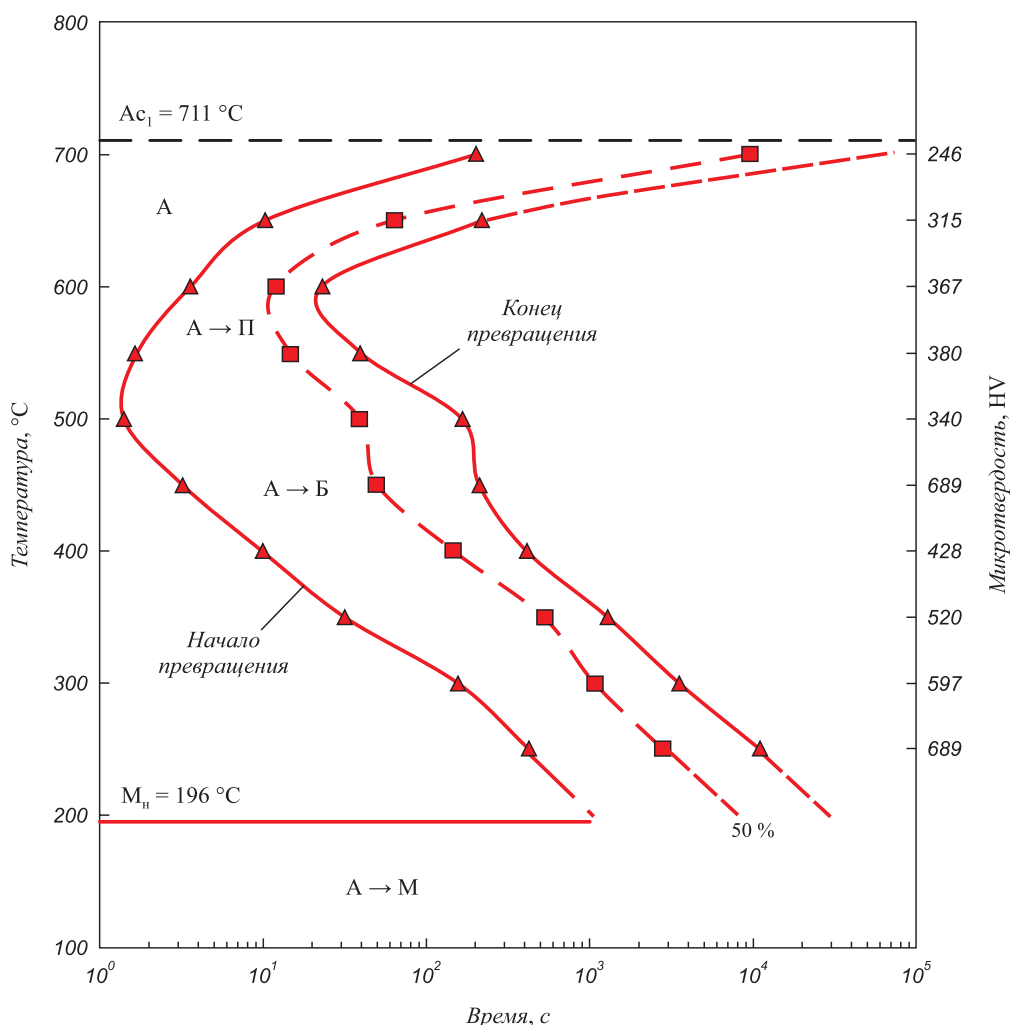


Рис. 1. Изотермическая диаграмма распада переохлажденного аустенита стали 80ГС

Fig. 1. Isothermal decomposition diagram of supercooled austenite of 80GS steel

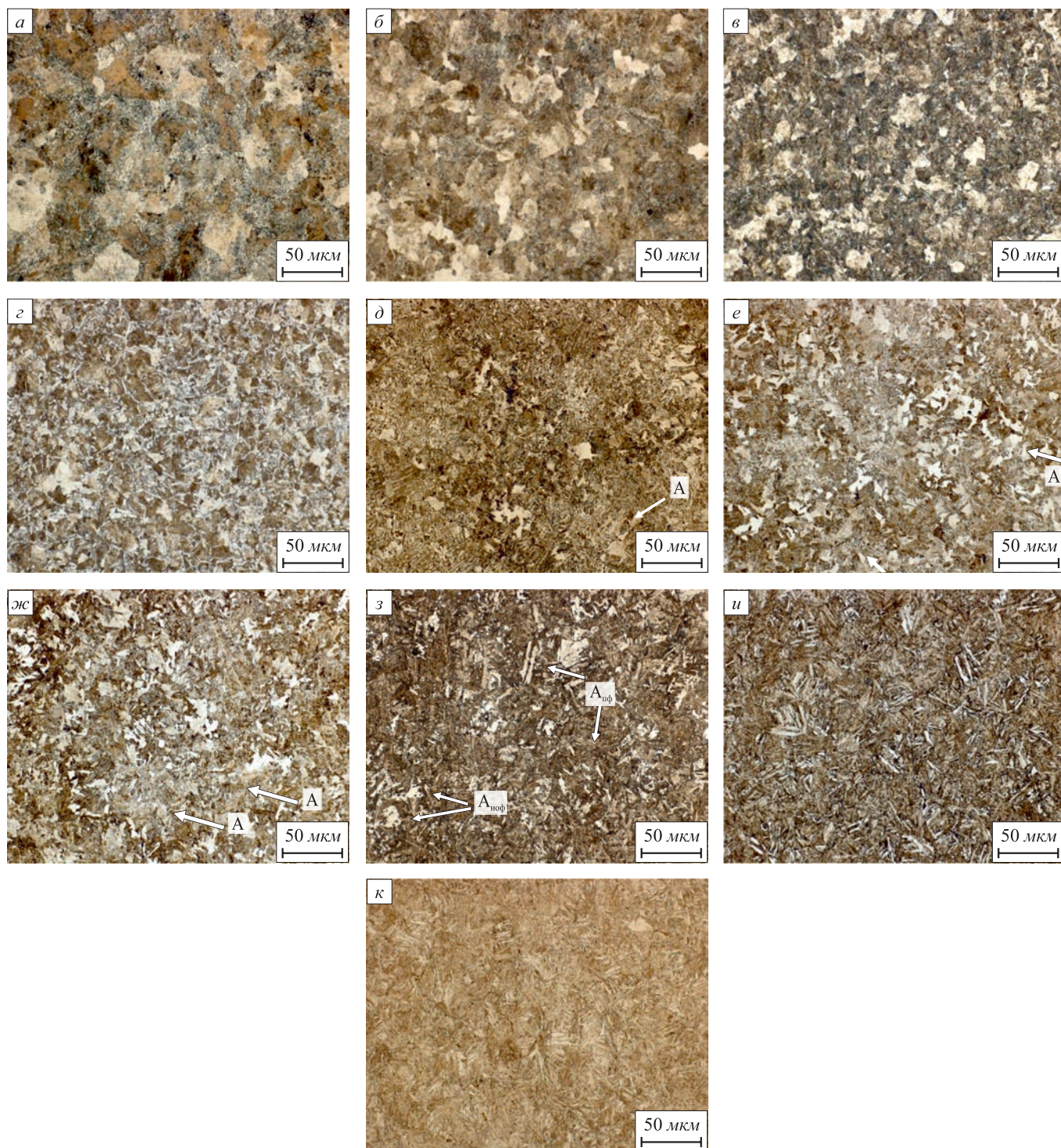


Рис. 2. Структура стали Э76 после распада переохлажденного аустенита при температурах 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300 и 250 °С (а – е). Стрелками показаны аустенит неправильной округлой формы (А), прямоугольной формы ($A_{пф}$) и остроугольной формы ($A_{оф}$)

Fig. 2. Structure of E76 steel after decomposition of supercooled austenite at temperatures 500, 450, 400, 350, 300 and 250 °C (a – e).

Arrows show austenite of irregular rounded shape (A), rectangular shape ($A_{пф}$) and acute-angled shape ($A_{оф}$)

При температуре 350 °С формируется переходная структура от верхнего бейнита к нижнему бейниту, при этом встречаются островки остаточного аустенита неправильной округлой формы (как в верхнем бейните) и светлые области остаточного аустенита прямоугольной ($A_{пф}$) или остроугольной формы ($A_{оф}$), которые

расположены между пластинами бейнитной α -фазы (рис. 2, з). При этом твердость повышается до 520 HV.

При температурах 300 – 250 °С при изотермической выдержке переохлажденный аустенит превращается в нижний бейнит, который состоит из светлых областей остаточного аустенита, как правило, остроугольной или

прямоугольной формы, и бейнитной α -фазы с карбидными выделениями внутри (рис. 2, и, к). Твердость таких структур наибольшая из полученных при изотермическом распаде и составляет 597 и 689 HV соответственно.

Температура минимальной устойчивости переохлажденного аустенита стали R350LHT составляет 500 °C. Структуры перлитного типа получены в интервале температур от 700 до 600 °C. При температуре 550 °C наблюдается переход от перлитного к бейнитному превращению. В интервале температур от 500 до 250 °C реализуется бейнитное превращение: в интервале температур 500 – 400 °C образуется верхний бейнит; при 350 °C – смесь верхнего и нижнего бейнита; в интервале 300 – 250 °C – нижний бейнит.

Практически во всем изученном температурном интервале изотермического распада переохлажденного аустенита наблюдается увеличение твердости продуктов превращения при понижении температуры выдержки от 246 (при 700 °C) до 689 HV (при 250 °C). Однако при 500 °C наблюдается небольшое падение твердости.

Выводы

По результатам проведенных dilatометрических, металлографических и дюрOMETрических исследова-

ний процесса распада переохлажденного аустенита стали R350LHT при непрерывном охлаждении и в изотермических условиях были построены изотермическая диаграмма распада переохлажденного аустенита исследуемой стали.

Установлено, что термокинетическая диаграмма, построенная при непрерывном охлаждении, смещается вниз и вправо по сравнению с изотермической диаграммой. Определены критические точки стали R350LHT: $A_{c1} = 711$ °C; $M_n = 196$ °C.

Определенная по изотермической диаграмме распада переохлажденного аустенита стали R350LHT температура минимальной устойчивости переохлажденного аустенита составила 500 °C. В изотермических условиях структуры перлитного типа реализуются в интервале температур от 700 до 600 °C. При температуре 550 °C формируется смесь структур перлитного и бейнитного типа. Бейнитные структуры формируются в диапазоне температур 500 – 250 °C. Твердость продуктов распада переохлажденного аустенита во всем исследованном температурном интервале увеличивается при снижении температуры выдержки от 246 (при 700 °C) до 689 HV (при 250 °C). При 500 °C происходит небольшое падение твердости, что, по-видимому, вызвано появлением остаточного аустенита при развитии бейнитного превращения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Блантер М.Е. Теория термической обработки. М.: Металлургия, 1984. 328 с.
2. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали. М.: Металлургия, 1985. 408 с.
3. Теория сварочных процессов / А.В. Коновалов, А.С. Куркин, Э.Л. Макаров и др. М.: изд. МГТУ им. Баумана, 2007. 559 с.
4. Weingrill L., Krutzler J., Enzinger N. Temperature field evolution during flash butt welding of railway rails // *Materials Science Forum*. 2017. Vol. 879. P. 2088–2093.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.879.2088>
5. Yamamoto R., Komizu Y., Fukada Y. Experimental examination for understanding of transition behaviour of oxide inclusions on gas pressure weld interface: joining phenomena of gas pressure welding // *Welding International*. 2014. Vol. 28. No. 7. P. 510–520.
<https://doi.org/10.1080/09507116.2012.753237>
6. Fujii M., Nakanowatari H., Nariai K. Rail flash-butt welding technology // *JFE Technical Report*. 2015. No. 20. P. 159–163.
7. Saita K., Karimine K., Ueda M., Iwano K., Yamamoto T., Hiroguchi K. Trends in rail welding technologies and our future approach // *Nippon Steel and Sumitomo Metal Technical Report*. 2013. No. 105. P. 84–92.
8. Dahl B., Mogard B., Grefott B., Ulander B. Repair of rails on-site by welding // *Svetsaren*. 1995. Vol. 50. No. 2. P. 10–14.
9. Takimoto T. Latest welding technology for long rail and its reliability // *Tetsu-to-Hagane*. 1984. Vol. 70. No. 10. P. 40–45.
http://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.70.10_1348
10. Tachikawa H., Uneta T., Nishimoto H., Sasaki Y., Yanai J. Steel welding technologies for civil construction applications // *Nippon Steel Technical Report*. 2000. Vol. 82. No. 7. P. 35–41.
11. Okumura M., Karimine K., Uchino K., Yurioka N. Development of field fusion welding technology for rail-roadrails // *Nippon Steel Technical Report*. 1995. Vol. 65. No. 4. P. 41–49.
12. Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Прудников А.Н., Башенко Л.П. Разработка и моделирование технологического
1. Blanter M.E. *Theory of Heat Treatment*. Moscow: Metallurgiya, 1984, 328 p. (In Russ.).
2. Gol'dshtein M.I., Grachev S.V., Veksler Yu.G. *Special Steels*. Moscow: Metallurgiya, 1985, 408 p. (In Russ.).
3. Kononov A.V., Kurkin A.S., Makarov E.L., etc. *Theory of Welding Processes*. Moscow: Bauman STU, 2007, 559 p. (In Russ.).
4. Weingrill L., Krutzler J., Enzinger N. Temperature field evolution during flash butt welding of railway rails. *Materials Science Forum*. 2017, vol. 879, pp. 2088–2093.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.879.2088>
5. Yamamoto R., Komizu Y., Fukada Y. Experimental examination for understanding of transition behaviour of oxide inclusions on gas pressure weld interface: joining phenomena of gas pressure welding. *Welding International*. 2014, vol. 28, no. 7, pp. 510–520.
<https://doi.org/10.1080/09507116.2012.753237>
6. Fujii M., Nakanowatari H., Nariai K. Rail flash-butt welding technology. *JFE Technical Report*. 2015, no. 20, pp. 159–163.
7. Saita K., Karimine K., Ueda M., Iwano K., Yamamoto T., Hiroguchi K. Trends in rail welding technologies and our future approach. *Nippon Steel and Sumitomo Metal Technical Report*. 2013, no. 105, pp. 84–92.
8. Dahl B., Mogard B., Grefott B., Ulander B. Repair of rails on-site by welding. *Svetsaren*. 1995, vol. 50, no. 2, pp. 10–14.
9. Takimoto T. Latest welding technology for long rail and its reliability. *Tetsu-to-Hagane*. 1984, vol. 70, no. 10, pp. 40–45.
http://doi.org/10.2355/tetsutohagane1955.70.10_1348
10. Tachikawa H., Uneta T., Nishimoto H., Sasaki Y., Yanai J. Steel welding technologies for civil construction applications. *Nippon Steel Technical Report*. 2000, vol. 82, no. 7, pp. 35–41.
11. Okumura M., Karimine K., Uchino K., Yurioka N. Development of field fusion welding technology for rail-roadrails. *Nippon Steel Technical Report*. 1995, vol. 65, no. 4, pp. 41–49.
12. Kozыrev N.A., Shevchenko R.A., Usol'tsev A.A., Prudnikov A.N., Bashchenko L.P. Welding of differentially heat-strengthened rails.

- процесса сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов. Промышленное опробование // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 5. С. 305–312. <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-305-312>
13. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Kratko S.N., Kryukov R.E., Mikhno A.R. Development of technology for manufacturing rail strings for railway access roads to mines // IOP Conference Series: Earth and Environmental. 2019. Vol. 377. Article 0121021. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/377/1/012021>
 14. Калашников Е.А., Королев Ю.А. Технологии сварки рельсов: тенденции в России и за рубежом // Путь и путевое хозяйство. 2015. № 8. С. 2–6.
 15. Шур Е.А. Влияние структуры на эксплуатационную стойкость рельсов // В кн.: Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов. Сб. статей. Екатеринбург: УИМ, 2006. С. 37–63.
 16. Шур Е.А., Резанов В.А. Комплексный метод контактной сварки рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 3. С. 20–22.
 17. Myers J., Geiger G.H., Poirier D.R. Structure and properties of thermite welds in rails // Welding Journal. 1982. Vol. 61. No. 8. P. 258–268.
 18. Тихомирова Л.Б., Ильиных А.С., Галай М.С., Сидоров Е.С. Исследование структуры и механических свойств алюминотермических сварных соединений рельсов // Вестник ЮУрГУ. Серия: Металлургия. 2016. Т. 16. № 3. С. 90–95. <http://doi.org/10.14529/met160313>
 19. Зюзин В.И. Влияние легирующих элементов на кинетику изотермического превращения и распада аустенита. Труды Уральского филиала АН СССР. М.: Металлургиздат, 1941. 109 с.
 20. Полевой Е.В., Симонов Ю.Н., Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Башченко Л.П. Исследование фазовых и структурных превращений при формировании сварного соединения из рельсовой стали. Сообщение 1. Термокинетическая диаграмма распада переохлажденного аустенита рельсовой стали R350LHT // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 2. С. 95–103. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-2-95-103>
 - Industrial testing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 5, pp. 305–312. (In Russ.). <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-5-305-312>
 13. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Kratko S.N., Kryukov R.E., Mikhno A.R. Development of technology for manufacturing rail strings for railway access roads to mines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental*. 2019, vol. 377, article 0121021. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/377/1/012021>
 14. Kalashnikov E.A., Korolev Yu.A. Rail welding technologies: Trends in Russia and abroad. *Put' i putevoe khozyaistvo*. 2015, no. 8, pp. 2–6. (In Russ.).
 15. Shur E.A. Influence of structure on rails service life. In: *Influence of Metal Matrix Properties on Rails Service Life. Coll. of Papers*. Yekaterinburg: UIM, 2006, pp. 37–63. (In Russ.).
 16. Shur E.A., Rezanov V.A. Complex method of rails resistance welding. *Vestnik VNIIZhT*. 2012, no. 3, pp. 20–22. (In Russ.).
 17. Myers J., Geiger G.H., Poirier D.R. Structure and properties of thermite welds in rails. *Welding Journal*. 1982, vol. 61, no. 8, pp. 258–268.
 18. Tikhomirova L.B., Il'inykh A.S., Galai M.S., Sidorov E.S. Investigation of structure and mechanical properties of aluminothermic welded joints of rails. *Bulletin of South Ural State University. Series "Metallurgy"*. 2016, vol. 16, no. 3, pp. 90–95. (In Russ.). <http://doi.org/10.14529/met160313>
 19. Zyuzin V.I. Influence of alloying elements on the kinetics of isothermal transformation and decomposition of austenite. *Proceedings of the Ural Branch of the USSR Academy of Sciences*. Moscow: Metallurgizdat, 1941, 109 p. (In Russ.).
 20. Polevoi E.V., Simonov Yu.N., Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Bashchenko L.P. Phase and structural transformations when forming a welded joint from rail steel. Report 1. Thermokinetic diagram of decomposition of supercooled austenite of R350LHT rail steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 2, pp. 95–103. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-2-95-103>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Егор Владимирович Полевой, к.т.н., начальник бюро металловедения и термической обработки технического отдела рельсовой площадки, АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»

E-mail: egor.polevoj@evraz.com

Юрий Николаевич Симонов, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов», Пермский национальный исследовательский политехнический университет

E-mail: simonov@pstu.ru

Николай Анатольевич Козырев, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой материаловедения, литейного и сварочного производства, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-7391-6816

E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Роман Алексеевич Шевченко, ассистент кафедры материаловедения, литейного и сварочного производства, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: shefn1200@mail.ru

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

ORCID: 0000-0003-1878-909X

E-mail: luda.baschenko@gmail.com

Egor V. Polevoi, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Bureau of Metal Science and Heat Treatment of Rail Production Technical Department, JSC "EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant"

E-mail: egor.polevoj@evraz.com

Yurii N. Simonov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair of Metal Science, Thermal and Laser Processing of Metals, Perm National Research Polytechnic University

E-mail: simonov@pstu.ru

Nikolai A. Kozyrev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production", Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-7391-6816

E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Roman A. Shevchenko, Assistant of the Chair "Materials, Foundry and Welding Production", Siberian State Industrial University

E-mail: shefn1200@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

ВКЛАД АВТОРОВ:

Полевой Е.В. – подготовка образцов для проведения дилатометрических исследований, редактирование финальной версии.

Симонов Ю.Н. – проведение дилатометрических исследований, анализ дилатограмм, построение термокинетической диаграммы распада переохлажденного аустенита.

Козырев Н.А. – научное руководство, определение целей и задач, проведение металлографических исследований, подбор и анализ источников информации по теме структурных превращений в рельсовой стали, редактирование финальной версии.

Шевченко Р.А. – проведение измерений микротвердости, проведение расчетов, редактирование финальной версии.

Бащенко Л.П. – подбор и анализ источников информации по теме распада переохлажденного аустенита для рельсовых сталей, редактирование финальной версии.

Поступила в редакцию 24.09.2020

После доработки 15.01.2021

Принята к публикации 20.01.2021

Received 24.09.2020

Revised 15.01.2021

Accepted 20.01.2021



Оригинальная статья

УДК 669.168

DOI 10.17073/0368-0797-2021-4-273-281



ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ И ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ РУД

О. И. Нохрина, И. Д. Рожихина, И. А. Рыбенко,
М. А. Голодова, А. О. Израильский

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

Аннотация. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса выщелачивания полиметаллических марганецсодержащих и железомарганцевых руд. Термодинамические расчеты и экспериментальные исследования по обогащению марганецсодержащего сырья позволили определить основные технологические параметры извлечения марганца, железа и цветных металлов, разработать технологические схемы обогащения различных видов марганецсодержащего сырья. Исследования проводили для полиметаллических и железомарганцевых руд Кайгадатского месторождения, месторождения Селезень, участка Сугул, расположенных на территории Кемеровской области – Кузбасса. Перед проведением лабораторных исследований был выполнен термодинамический анализ процесса выщелачивания руд, химический и рентгеноструктурный анализы проб. Лабораторные исследования проводили на многокамерной автоклавной установке МКА-4-75 с использованием в качестве растворителя хлорида кальция и хлорида железа. При введении в состав шихты восстановителя заметно улучшаются условия растворения оксидов и гидроксидов марганца при выщелачивании, поэтому была проведена серия опытов с использованием в шихте древесного угля. Выполненные термодинамические расчеты показали, что процесс выщелачивания полностью реализуем в интервале температур от 323 до 673 К. Результаты экспериментов подтвердили теоретические исследования. Полученные данные позволили предложить технологическую схему гидрометаллургического обогащения полиметаллических и железомарганцевых руд для получения высококачественных концентратов. Все продукты переработки пригодны к использованию. Применение оптимальных технологических параметров обогащения позволяет из полиметаллического марганецсодержащего сырья извлекать 95 – 97 % марганца, до 80 % никеля, до 99 % кобальта, 96 – 98 % железа. В результате осаждения этих элементов получают высококачественные концентраты марганца, никеля, железа, кобальта. По предложенной технологической схеме для железомарганцевого сырья с высоким содержанием силикатов возможно получение высококачественных концентратов марганца и железа, при этом извлечение марганца составит 90 – 92 %, железа 86 – 90 %.

Ключевые слова: железомарганцевые руды, полиметаллические марганцевые руды, обогащение, технологическая схема, термодинамические исследования

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Субъекта РФ (Кемеровская область – Кузбасс) в рамках научного проекта № 20-48-420001/20.

Для цитирования: Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Рыбенко И.А., Голодова М.А., Израильский А.О. Гидрометаллургическое обогащение полиметаллических и железомарганцевых руд // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 4. С. 273–281.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-273-281>

Original article

HYDROMETALLURGICAL ENRICHMENT OF POLYMETALLIC AND AND FERROMANGANESE ORE

O. I. Nokhrina, I. D. Rozhikhina, I. A. Rybenko,
M. A. Golodova, A. O. Izrail'skii

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

Abstract. The article presents the results of theoretical and experimental studies of leaching of polymetallic manganese-containing and ferromanganese ore. Thermodynamic calculations and experimental studies on enrichment of manganese-containing raw materials made it possible to determine the main technological parameters of the extraction of manganese, iron and non-ferrous metals, and to develop technological schemes for enrichment of various types of manganese-containing raw materials. The studies were carried out for polymetallic and ferromanganese ores of the Kaigadat deposit, the Selezhen deposit, the Sugul site, located in the Kemerovo Region – Kuzbass. Before carrying out laboratory studies, the authors have performed thermodynamic analysis of ore leaching, chemical and X-ray structural analyzes of the samples. Laboratory tests were carried out on a multi-chamber autoclave unit MKA-4-75 using calcium and iron chlorides as solvents. Since the introduction of a reducing agent into the charge during leaching significantly improves the conditions for dissolution of oxides and hydroxides of manganese in calcium chloride, a series of experiments was conducted with the use of charcoal in the charge. Thermodynamic calculations have shown that the leaching process is fully implemented in the temperature range from 323 to 673 K. The results of the experiments confirmed the theoretical research results. The obtained data allowed the authors

to propose a technological scheme for hydrometallurgical enrichment of polymetallic and ferromanganese ores to produce high-quality concentrates. All processed products are suitable for use. The use of optimal technological parameters of enrichment allows 95–97 % of manganese, up to 80 % of nickel, up to 99 % of cobalt, and 96–98 % of iron to be extracted from polymetallic manganese-containing raw materials. As a result of the deposition of these elements, high-quality concentrates of manganese, nickel, iron, cobalt are obtained. According to the proposed technological scheme for ferromanganese raw materials with a high content of silicates, it is possible to obtain high-quality concentrates of manganese and iron, while the extraction of manganese is 90–92 %, and of iron – 86–90 %.

Keywords: ferromanganese ores, polymetallic manganese ores, enrichment, technological scheme, thermodynamic research

Funding: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research and the Subject of the Russian Federation (Kemerovo Region – Kuzbass) in the framework of the scientific project No. 20-48-420001/20.

For citation: Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Rybenko I.A., Golodova M.A., Izrail'skii A.O. Hydrometallurgical enrichment of polymetallic and ferromanganese ore. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 273–281. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-273-281>

АКТУАЛЬНОСТЬ

Острота проблемы обеспечения марганцевыми ферросплавами на сегодняшний день определяется низким уровнем развития марганцевой рудной базы, а также отсутствием современных предприятий по добыче и подготовке марганцевого сырья для его использования в металлургии.

Без марганцевых ферросплавов не может обойтись производство стали подавляющего большинства марок. Содержание марганца в сталях обычно составляет от 0,5 до 2,0 %, а в некоторых и до 13,0 %.

Потребность России в марганцевых ферросплавах составляет порядка 600–650 тыс. т в год. Из импортных марганцевых руд выплавляется в основном ферромарганец углеродистый и силикомарганец. В последние годы в страну ввозится 800–1000 тыс. т марганцевых руд ежегодно, преимущественно из Казахстана, Бразилии, ЮАР, Турции [1].

В России имеются значительные балансовые запасы марганцевых руд (более 290 млн т), но марганцевые руды большинства отечественных месторождений отличаются невысоким качеством: при низком (18–33 %) содержании марганца и высоком (отношение Р/Мп более 0,006) удельном содержании фосфора они имеют повышенное содержание железа, кремнезема и относятся к труднообогатимым. При этом около 90 % балансовых запасов приходится на карбонатное сырье [2–4].

На территории Кемеровской области – Кузбасса расположено самое крупное месторождение марганцевых руд Усинское, представленное в основном карбонатными высокофосфористыми рудами (98,5 млн т); Дурновское месторождение (около 300 тыс. т) – оксидные руды, большая часть из которых железомарганцевые; месторождение Селезень, представленное как богатыми валунчатыми рудами (около 40 % Мп), так и обломками железомарганцевых руд (примерно 10 % Мп), сажистыми рудами (примерно 20 % Мп). Прогнозные запасы руды 5 млн т. В последние годы были выявлены проявления качественных марганцевых руд в пределах Алтае-Саянской металлогенической провинции участок Сугул; месторождение Селезень и участок Чумай в Кемеровской области, расположенные в Ташта-

гольском и Тисульском районах. При этом марганцевые руды месторождений Сугул и Чумай следует отнести к полиметаллическим рудам. Значительные запасы железомарганцевых руд находятся на Кайгадатском месторождении. В настоящее время эти руды не вовлечены в металлургическое производство.

Вовлечение в производство марганцевых руд этих месторождений возможно лишь при условии комплексного подхода к решению проблемы марганца, когда технически и экономически обоснованы все звенья одной цепочки: разведка месторождений, добыча и обогащение марганцевых руд, последующая их переработка и потребление.

Повышенный интерес к поискам новых способов обогащения бедных марганцевых и полиметаллических марганецсодержащих руд в последнее десятилетие отмечается как в России, так и за рубежом [5–18].

Комплекс работ, проведенных на кафедре металлургии черных металлов Сибирского государственного индустриального университета, показал возможность получения низкофосфористого марганцевого концентрата из карбонатных марганцевых руд. Использование для получения высококачественного марганцевого концентрата автоклавного выщелачивания марганца насыщенным раствором хлорида кальция с добавками до 5 % раствора хлорида железа и древесного угля позволяет применять этот метод для обогащения оксидных марганцевых руд [5].

Использование марганцевого концентрата в составе шихтовых материалов при производстве марганцевых ферросплавов в электропечах снижает удельный расход электроэнергии, повышает извлечение марганца и улучшает технико-экономические показатели производства. Полученные концентраты могут быть использованы для прямого легирования марганцем при обработке стали на агрегате печь-ковш.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕРИАЛЫ

Для изучения возможности обогащения марганцевых руд были исследованы руды Кайгадатского месторождения, сажистые руды и руды с брекчиевой текстурой месторождения Селезень, руды участка Сугул. Был проведен химический и рентгеноструктурный анализы

проб исходных руд. Химический анализ проводили с использованием стандартных методик в соответствии с ГОСТ 22772 – 96. Рентгеноструктурный анализ делали с использованием установки ДРОН-2.

Перед лабораторными исследованиями по комплексному обогащению марганцевых руд были проведены термодинамические исследования процессов выщелачивания металлов с использованием программного комплекса «Терра» [19].

Рассматривали следующие элементарные термодинамические системы: $MnO + FeCl_2 + H_2O$, $NiO + FeCl_2 + H_2O$, $CoO + FeCl_2 + H_2O$. Процессы в этих системах можно представить в виде следующих реакций:



Также была проведена термодинамическая оценка протекания реакции



Состав систем формировали в молях компонентов, количество каждого компонента 1 моль для всех систем. Расчеты проводили при давлении 0,1 МПа в диапазоне температур 273 – 673 К.

С использованием программного комплекса «Терра» были рассчитаны изменения энергии Гиббса для реакций (1) – (3) в зависимости от температуры и проведены термодинамические исследования процессов, протекающих по этим реакциям.

Лабораторные исследования по изучению выщелачивания оксидов марганца, железа, никеля и кобальта проводили на многокамерной автоклавной установке МКА-4-75. В установке одновременно помещаются четыре автоклава объемом 75 см³. Для перемешивания раствора при выщелачивании автоклавы закрепляли в металлической рамке, которую вращали в муфельной печи со скоростью 80 об/мин.

В качестве растворителя использовали насыщенный раствор хлорида кальция. Для приготовления раствора использовали технический $CaCl_2$ с содержанием около 96,6 % $CaCl_2$. Раствор $FeCl_2$ готовили растворением мягкого железа в соляной кислоте. Использовали древесный уголь марки А.

Методика эксперимента была следующая: навеску растворяемого материала загружали в автоклав, после чего заливали растворитель при соотношении Т:Ж = 1:(3 ÷ 4), автоклавы закрывали, закрепляли во вращающейся рамке, после чего температуру в камере поднимали до заданной величины. Продолжительность выдержки отсчитывали с момента достижения заданной температуры. После окончания опыта автоклавы извлекали из камеры и охлаждали до температуры примерно 80 – 90 °С, раствор отфильтровывали, остаток промывали, сушили при температуре 105 °С и анализировали. Извлечение марганца, железа, никеля и кобальта оценивали по содержанию этих элементов и массе хвостов.

Было проведено две серии опытов: в первой изучали условия выщелачивания марганца и примесей цветных металлов из полиметаллических марганецсодержащих руд, во второй – условия выщелачивания марганца и железа из железомарганцевых руд с высоким содержанием кремнезема.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Химический и фазовый составы марганцевых руд приведены в табл. 1, 2.

Из приведенных данных следует, что руды участка Сугул бедные, так как содержание марганца на уровне 18 % и высокое содержание кремнезема (примерно 50 %). Руды Кайгадатского месторождения, сажистые руды и руды с брекчиевой текстурой месторождения Селезень имеют высокое содержание железа и кремнезема. Поэтому руды этих месторождений не могут быть использованы для выплавки стандартных марганцевых сплавов, их необходимо обогащать. Кроме того, в рудах участка Сугул достаточно высокое содержание цветных металлов, которые также, как и марганец, могут быть

Т а б л и ц а 1

Результаты химического анализа марганцевых руд

Table 1. Results of chemical analysis of manganese ores

Месторождение (руда)	Содержание, %									
	MnO	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P	Ni	Co	Cu
Сугул	26,33	50,06	0,91	0,88	6,65	2,89	0,050	0,5	3,0	0,7
Селезень (сажистая)	18,37	62,00	1,94	1,83	4,86	7,32	0,104	–	–	–
Селезень (с брекчиевой текстурой)	14,76	59,31	1,48	1,30	7,51	12,68	0,101	–	–	–
Кайгадатское	11,2	49,20	1,35	1,62	3,20	26,70	0,110	–	–	–

Таблица 2

Фазовый состав марганцевых руд

Table 2. Phase composition of manganese ores

Месторождение (руда)	Фазовый состав		
	много	присутствует	немного
Селезень (сажистая)	SiO ₂ – кварц	пирролизит MnO ₂ , рентгеноаморфное вещество	Fe ₂ O ₃ , тальк, примеси
Селезень (брекчиевая)	SiO ₂ – кварц	криptomелан – K ₂₋₃ Mn ₈ O ₁₆ , HFeO ₂ – гетит	гидромусковит, примеси
Сугул	тодорокит	кварц, криptomелан	вернадит, примеси
Кайгадатское	SiO ₂ – кварц	криptomелан – K ₂₋₃ Mn ₈ O ₁₆ , рентгеноаморфное вещество	HFeO ₂ – гетит, тальк, примеси

извлечены при комплексном обогащении марганцевых руд. Следует отметить, что используемые руды имеют сложный фазовый состав.

Расчеты изменения энергии Гиббса для реакций (1) – (3) с использованием программного комплекса «Терра» в зависимости от температуры представлены на рис. 1.

Для всех трех реакций в рассматриваемом температурном интервале изменение изобарно-изотермического потенциала отрицательно и реакции протекают в прямом направлении.

Результаты исследования процесса выщелачивания марганца, никеля, кобальта по реакциям (1) – (3) представлены на рис. 2. Процесс полностью реализуем на всем заданном температурном интервале. Равновесный состав представлен соединениями MnCl₂ (0,58 кг/кг смеси) и Fe(OH)₂ (0,41 кг/кг смеси).

Аналогичные результаты получены для систем с никелем (рис. 2, б) и кобальтом (рис. 2, в). Процесс также полностью реализуется в интервале температур 323 – 673 К. В равновесном состоянии содержание хло-

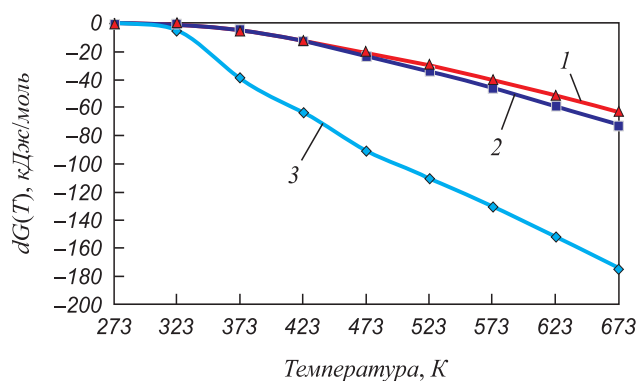


Рис. 1. Зависимости изменения изобарно-изотермического потенциала от температуры для реакций (1) – (3):

▲ – Mn; ◆ – Ni; ■ – Co; * – Fe

Fig. 1. Dependences of the change in isobaric-isothermal potential on temperature for reactions (1) – (3):

▲ – Mn; ◆ – Ni; ■ – Co; * – Fe

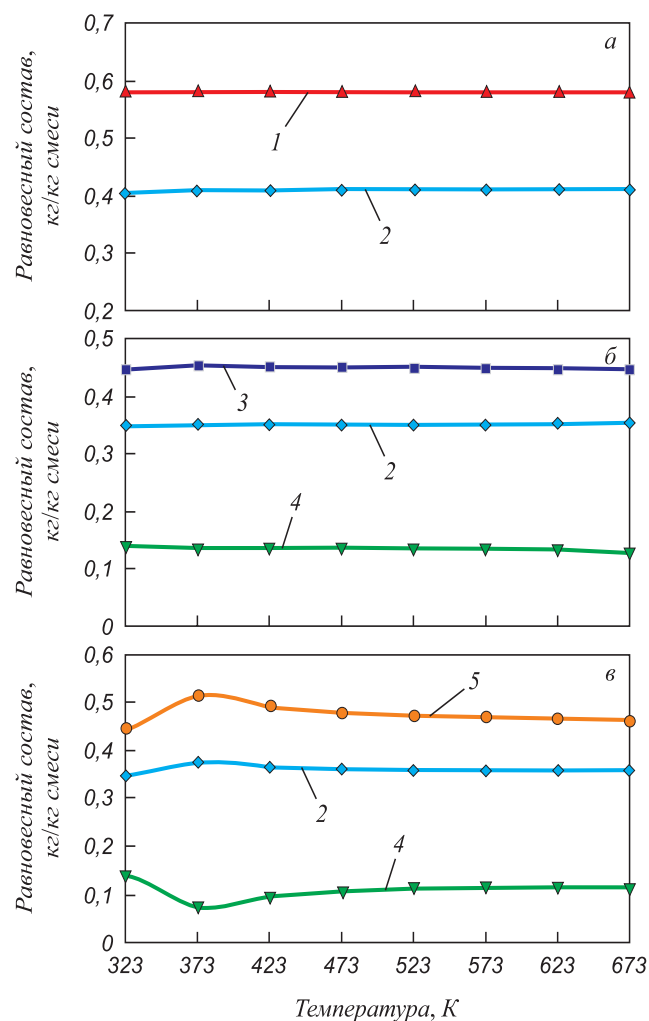


Рис. 2. Зависимости изменения равновесного состава систем MnO + FeCl₂ + H₂O (а), NiO + FeCl₂ + H₂O (б), CoO + FeCl₂ + H₂O (в) от температуры: 1 – MnCl₂(с); 2 – Fe(OH)₂; 3 – NiCl₂(с); 4 – FeCl₂(с); 5 – CoCl₂(с)

Fig. 2. Dependences of changes in the equilibrium composition of systems MnO + FeCl₂ + H₂O (а), NiO + FeCl₂ + H₂O (б), CoO + FeCl₂ + H₂O (в) on temperature: 1 – MnCl₂(с); 2 – Fe(OH)₂; 3 – NiCl₂(с); 4 – FeCl₂(с); 5 – CoCl₂(с)

Показатели извлечения марганца, кобальта, никеля и меди

Table 3. Indicators of extraction of manganese, cobalt, nickel and copper

Проба	Содержание в осадке, %					Извлечение, %			
	Mn	MnO ₂	Co	Ni	Cu	Mn	Co	Ni	Cu
1	0,015	следы	0,0073	0,112	0,085	99,17	97,76	74,79	68,97
2	0,013	следы	0,0019	0,080	0,075	99,20	99,15	81,77	72,80
3	0,015	следы	0,0020	0,120	0,095	99,18	99,25	69,94	59,31
4	0,013	следы	0,0022	0,125	0,113	99,25	99,28	72,38	58,73

рида никеля составляет 0,45 кг/кг смеси, для системы с кобальтом совместно с хлоридом кобальта (примерно 0,6 кг/кг смеси) присутствует порядка 0,06 кг/кг смеси. В обоих случаях присутствует также Fe(OH)₂ (примерно 0,35 кг/кг смеси).

Результаты теоретического анализа процессов выщелачивания марганца и примесей цветных металлов (рис. 2) показали, что при использовании в качестве растворителя хлорида железа эти элементы переходят в раствор практически полностью, а железо выпадает в осадок в виде гидроксида. Это позволит не использовать дополнительных операций для очистки раствора. Процесс протекает при температурах выше 423 К.

Результаты автоклавного выщелачивания проб руды участка Сугул при использовании в качестве растворителя хлорида железа приведены в табл. 3.

Результаты экспериментов подтвердили результаты теоретических исследований и показали, что при использовании в качестве растворителя раствора хлорида железа наряду с марганцем извлекаются в раствор никель и кобальт. Использование технологической схемы [20] показало, что при автоклавном выщелачивании полиметаллических марганецсодержащих руд с высоким содержанием кремнезема после селективного осаждения этих элементов можно получать высококачественные концентраты: марганцевый (57 – 59 % Mn); никелевый (44 – 46 % Ni); железный (58 – 60 % Fe); кобальтовый (31 – 33 % Co). Применение оптимальных технологических параметров обогащения позволяет извлекать из сырья до 99 % марганца, 80 % никеля, 99 % кобальта.

При обогащении железомарганцевых руд наряду с марганцем целесообразно извлекать железо. Результаты теоретического исследования процесса выщелачивания железа с использованием раствора CaCl₂ показали, что реализация процесса в рассматриваемом интервале температур невозможна (рис. 3).

В работе [5] теоретически и экспериментально было показано, что введение в шихту при выщелачивании восстановителя (древесный уголь) заметно улучшает условия растворения оксидов и гидроксидов марганца (особенно MnO) в хлористом кальции. Поэтому для выщелачивания марганца и железа из железомарганце-

вых руд вводили в шихту древесный уголь. Результаты экспериментов показали, что введение в шихту древесного угля в количестве 1,0 – 1,5 % позволяет извлекать 85 – 90 % железа и только 43 – 46 % марганца (I стадия). Для повышения эффективности извлечения марганца осадок после обработки руды растворами хлорида кальция с добавками древесного угля подвергали выщелачиванию раствором хлорида кальция с добавками 2,6 % хлорида железа FeCl₂ (II стадия). В табл. 4 приведены результаты выщелачивания железомарганцевых руд с высоким содержанием силикатов. Как показали результаты исследований, раствор FeCl₂ не только улучшает полноту протекания процесса, но и ускоряет растворение марганца из оксидов и силикатов.

На основании результатов исследования может быть предложена двухстадийная схема обогащения железомарганцевых руд Кузбасса (рис. 4). Использование предложенной схемы позволит получать высококачественные концентраты марганца (58 – 60 % Mn), железа (48 – 54 % Fe), при этом извлечение марганца составит 90 – 92 %, железа 86 – 90 %. Все продукты переработки пригодны к использованию в металлургическом производстве.

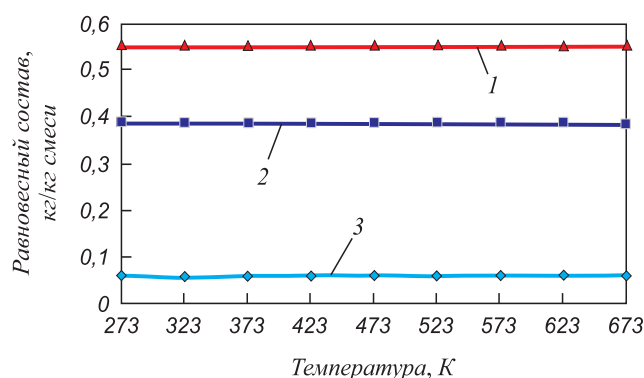


Рис. 3. Зависимости изменения равновесного состава системы FeO + CaCl₂ + H₂O от температуры: 1 – Fe₃O₄(с); 2 – CaCl₂(с); 3 – H₂O

Fig. 3. Dependences of changes in the equilibrium composition of the system FeO + CaCl₂ + H₂O on temperature: 1 – Fe₃O₄(с); 2 – CaCl₂(с); 3 – H₂O

Результаты выщелачивания железомарганцевых руд

Table 4. Results of ferromanganese ores leaching

Месторождение (руда)	Содержание Mn/Fe в «хвостах», % (I стадия)	Содержание Mn/Fe в осадке, % (II стадия)	Содержание Mn (III стадия)	Извлечение Mn
Селезень (сажистая)	0,78/2,045	1,64/54,73	59,6	90
Селезень (с брекчиевой текстурой)	0,55/1,160	0,30/47,76	59,1	91,1
Кайгадатское	0,62/1,39	0,96/49,35	58,9	90,2

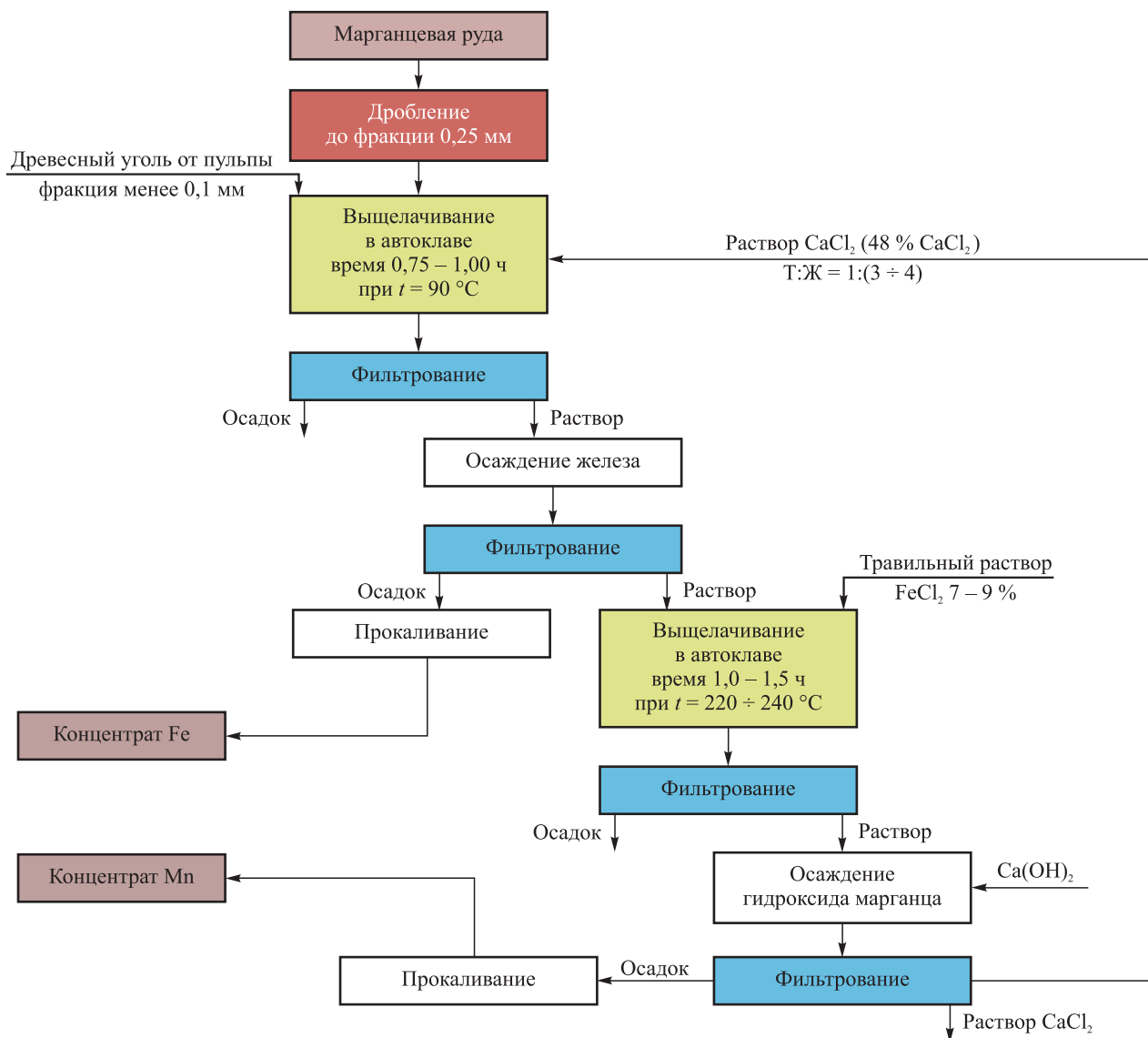


Рис. 4. Схема обогащения железомарганцевых руд

Fig. 4. Scheme of ferromanganese ore enrichment

Выводы

Термодинамические расчеты, выполненные с использованием программного комплекса «Терра», и экспериментальные исследования по обогащению марганец-

содержащего сырья позволили определить основные технологические параметры извлечения марганца, железа и цветных металлов, разработать технологические схемы обогащения различных видов марганецсодержащего сырья.

Результаты теоретических исследований процессов выщелачивания марганца, кобальта, никеля из полиметаллических марганцевых руд с использованием в качестве растворителя раствора хлорида железа (II) показали, что в температурном интервале 323 – 673 К изменение изобарно-изотермического потенциала отрицательно и реакции выщелачивания протекают в прямом направлении.

Результаты экспериментов подтвердили данные теоретических исследований и показали, что при использовании в качестве растворителя раствора хлорида железа наряду с марганцем извлекаются в раствор никель и кобальт. Указанные элементы переходят в раствор практически полностью, а железо выпадает в осадок в виде гидроксида. Это позволит не использовать дополнительных операций для очистки раствора. Процесс протекает при температурах выше 423 К.

Применение в шихте для выщелачивания железомарганцевых руд с высоким содержанием силикатов 1,0 – 1,5 % древесного угля позволяет извлекать

86 – 90 % железа (I стадия) и введение в растворитель CaCl_2 2,6 % хлорида железа (II) позволяет извлекать 90 – 92 % марганца (II стадия).

При автоклавном выщелачивании полиметаллических марганецсодержащих руд с высоким содержанием кремнезема после селективного осаждения этих элементов можно получать высококачественные концентраты: марганцевый (57 – 59 % Mn); никелевый (44 – 46 % Ni); железный (58 – 60 % Fe); кобальтовый (31 – 33 % Co).

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований предложены схема обогащения марганцевых полиметаллических руд и двухстадийная схема обогащения железомарганцевых руд. Использование предложенной схемы обогащения железомарганцевых руд позволит получать высококачественные концентраты марганца (58 – 60 % Mn), железа (48 – 54 % Fe). Применение оптимальных технологических параметров обогащения позволяет извлекать из сырья до 97 % марганца, 80 % никеля, 99 % кобальта, 96 – 98 % железа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Группа аналитиков по изучению сырья, металлов и продукции из них International Metallurgical Research Group. Екатеринбург, 2009. URL: <http://metallresearch.ru> (дата обращения 24.04.2020).
2. Борисов С.М., Зябкин А.В., Старкин С.С. Результаты геолого-разведочных работ на марганцевые руды в Кемеровской области. В кн.: Состояние марганцево-рудной базы России и вопросы обеспечения промышленности марганцем. Материалы научно-технической конференции. Красноярск: КНИИГиМС, 2001. С. 36–38.
3. Литвинцева Э.Г., Тигунов Л.П., Бронницкая Е.С. и др. Разработка эффективных способов обогащения и переработки окисленных и карбонатных руд марганца месторождений России. В кн.: Состояние марганцево-рудной базы России и вопросы обеспечения промышленности марганцем. Материалы научно-технической конференции. Красноярск: КНИИГиМС, 2001. С. 138–143.
4. Федоров Ю.О. Опыт и практика рентгенорадиометрического обогащения марганцевых руд. В кн.: Состояние марганцево-рудной базы России и вопросы обеспечения промышленности марганцем. Материалы научно-технической конференции. Красноярск: КНИИГиМС, 2001. С. 163–165.
5. Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Прошунин И.Е. Получение высококачественных концентратов при обогащении марганцевых руд. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ, 2019. 182 с.
6. Нохрина О.И., Рожихина И.Д., Прошунин И.Е., Ходосов И.Е. Обогащение полиметаллических марганецсодержащих руд и рациональное использование полученных концентратов // Известия вузов. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 5. С. 309–315. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-5-309-315>
7. Нохрина О.И., Рожихина И.Д. Получение малофосфористого концентрата из руд и железомарганцевых конкреций // Известия вузов. Черная металлургия. 2000. № 8. С. 40–45.
8. Сутырин Ю. Анализ состояния гидрометаллургической переработки марганцевого сырья // Национальная металлургия. 2003. № 2. С. 99–104.
9. Vracar R.Z., Cerovic K.P. Manganese leaching in the FeS_2 – MnO_2 – O_2 – H_2O system at high temperature in an autoclave // Hydrometallurgy. 2000. Vol. 55. No. 1. P. 79–92. [http://doi.org/10.1016/S0304-386X\(99\)00076-6](http://doi.org/10.1016/S0304-386X(99)00076-6)
10. Hatk P.K., Sukla L.B., Das S.C. Aqueous SO_2 leaching studies on Nishikhal manganese ore through factorial experiment //
1. Group of Analysts for the Study of Raw Materials, Metals and Products from Them. International Metallurgical Research Group. Yekaterinburg, 2009. Available at URL: <http://metallresearch.ru> (accessed 24.04.2020). (In Russ.).
2. Borisov S.M., Zhabkin A.V., Starkin S.S. Results of exploration work for manganese ores in Kemerovo Region. In: *State of Manganese-Ore Base in Russia and Providing the Industry with Manganese: Materials of the Sci. and Tech. Conf.* Krasnoyarsk: KNIIGiMS, 2001, pp. 36–38. (In Russ.).
3. Litvintseva E.G., Tiginov L.P., Bronitskaya E.S., etc. Development of Efficient methods for enrichment and processing of oxidized and carbonate manganese ores from Russian deposits. In: *State of Manganese-Ore Base in Russia and Providing the Industry with Manganese: Materials of the Sci. and Tech. Conf.* Krasnoyarsk: KNIIGiMS, 2001, pp. 138–143. (In Russ.).
4. Fedorov Yu.O. Experience and practice of X-ray radiometric enrichment of manganese ores. In: *State of Manganese-Ore Base in Russia and Providing the Industry with Manganese: Materials of the Sci. and Tech. Conf.* Krasnoyarsk: KNIIGiMS, 2001, pp. 163–165. (In Russ.).
5. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Proshunin I.E. *Production of High-Quality Concentrates by Manganese Ores Processing*. Novokuznetsk: RC SibSIU, 2019, 182 p. (In Russ.).
6. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Proshunin I.E., Khodosov E.I. Polymetallic manganese ore dressing and optimal use of the obtained concentrates. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 5, pp. 309–315. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-5-309-315>
7. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D. Obtaining low-phosphorus concentrates from ores and ferromanganese nodules. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2000, no. 8, pp. 40–45. (In Russ.).
8. Sutyurin Yu. Analysis of the state of hydrometallurgical processing of manganese raw materials. *Natsional'naya metallurgiya*. 2003, no. 2, pp. 99–104. (In Russ.).
9. Vracar R.Z., Cerovic K.P. Manganese leaching in the FeS_2 – MnO_2 – O_2 – H_2O system at high temperature in an autoclave. *Hydrometallurgy*. 2000, vol. 55, no. 1, pp. 79–92. [http://doi.org/10.1016/S0304-386X\(99\)00076-6](http://doi.org/10.1016/S0304-386X(99)00076-6)
10. Hatk P.K., Sukla L.B., Das S.C. Aqueous SO_2 leaching studies on Nishikhal manganese ore through factorial experiment. *Hydrome-*

- Hydrometallurgy. 2000. Vol. 54. No. 2. P. 217–228.
[http://doi.org/10.1016/S0304-386X\(99\)00075-4](http://doi.org/10.1016/S0304-386X(99)00075-4)
11. Trifoni M., Toro L., Veglio F. Reductive leaching of manganiferous ores by glucose and H_2SO_4 : Effect of alcohols // *Hydrometallurgy*. 2001. Vol. 59. No. 1. P. 1–14.
[http://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00138-9](http://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00138-9)
12. Veglio F., Trifoni M., Abbruzzese C., Toro L. Column leaching of a manganese dioxide ore: A study by using fractional factorial design // *Hydrometallurgy*. 2001. Vol. 59. No. 1. P. 31–44.
[http://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00139-0](http://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00139-0)
13. Ding P., Liu Q.J., Pang W.H. A review of manganese ore beneficiation situation and development // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 380–384. P. 4431–4433.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.380-384.4431>
14. Kang T., Liu Y., Huang Y., Dong J., Huang Q., Li Y. Synthesis and dephosphorization of iron manganese composite oxide by acid leaching on iron manganese ore // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 554–556. P. 489–493.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.554-556.489>
15. Sun Da, Li Mao-lin, Li Can-hua, Cul Rui, Zheng Xia-yu. Green enriching process of Mn from low grade ore of manganese carbonate // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 644–650. P. 5427–5430.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.644-650.5427>
16. Yang Z.Z., Li G.Q., Huang C.H., Ding J.F. Mn ore smelting reduction based on double slag operation in BOF // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 753–755. P. 76–80.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.753-755.76>
17. Pan M.C., Liu X.L., Zou R., Huang J., Han J.C. Study of heat treatment technology on medium-carbon-low-alloy-steel large hammer formation of gradient performance // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 881–883. P. 1288–1292.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.881-883.1288>
18. Šalak A., Selecká M. Effect of manganese addition and sintering conditions on mechanical properties of low carbon 3Cr prealloyed steels // *Materials Science Forum*. 2011. No. 672. P. 55–58.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.672.55>
19. Трусов Б.Г. Программная система ТЕРРА для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах. В кн.: III Международный симпозиум «Горение и плазмохимия». 24–26 августа 2005. Алматы, Казахстан. Алматы: Казак университети, 2005. С. 52–57.
20. Пат. № 2583224 РФ. Способ химического обогащения полиметаллических марганецсодержащих руд / О.И. Нохрина, И.Д. Рожихина, П.Д. Кравченко, О.Ю. Кичигина, М.С. Костюк. Заявл. 12.01.2015; опублик. 10.05.2016. Бюл. № 13.
- tallurgy*. 2000. vol. 54, no. 2, pp. 217–228.
[http://doi.org/10.1016/S0304-386X\(99\)00075-4](http://doi.org/10.1016/S0304-386X(99)00075-4)
11. Trifoni M., Toro L., Veglio F. Reductive leaching of manganiferous ores by glucose and H_2SO_4 : Effect of alcohols. *Hydrometallurgy*. 2001, vol. 59, no. 1, pp. 1–14.
[http://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00138-9](http://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00138-9)
12. Veglio F., Trifoni M., Abbruzzese C., Toro L. Column leaching of a manganese dioxide ore: A study by using fractional factorial design. *Hydrometallurgy*. 2001, vol. 59, no. 1, pp. 31–44.
[http://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00139-0](http://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00139-0)
13. Ding P., Liu Q.J., Pang W.H. A review of manganese ore beneficiation situation and development. *Applied Mechanics and Materials*. 2013, vol. 380–384, pp. 4431–4433.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.380-384.4431>
14. Kang T., Liu Y., Huang Y., Dong J., Huang Q., Li Y. Synthesis and dephosphorization of iron manganese composite oxide by acid leaching on iron manganese ore. *Advanced Materials Research*. 2012, vol. 554–556, pp. 489–493.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.554-556.489>
15. Sun Da, Li Mao-lin, Li Can-hua, Cul Rui, Zheng Xia-yu. Green enriching process of Mn from low grade ore of manganese carbonate. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 644–650, pp. 5427–5430.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.644-650.5427>
16. Yang Z.Z., Li G.Q., Huang C.H., Ding J.F. Mn ore smelting reduction based on double slag operation in BOF. *Applied Mechanics and Materials*. 2013, vol. 753–755, pp. 76–80.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.753-755.76>
17. Pan M.C., Liu X.L., Zou R., Huang J., Han J.C. Study of heat treatment technology on medium-carbon-low-alloy-steel large hammer formation of gradient performance. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 881–883, pp. 1288–1292.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.881-883.1288>
18. Šalak A., Selecká M. Effect of manganese addition and sintering conditions on mechanical properties of low carbon 3Cr prealloyed steels. *Materials Science Forum*. 2011, no. 672, pp. 55–58.
<http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.672.55>
19. Trusov B.G. TERRA software system for modeling phase and chemical equilibria at high temperatures. In: *III Int. Symp. "Combustion and Plasma Chemistry". 24–26 August 2005. Almaty, Kazakhstan*. Almaty: Kazak universiteti, 2005, pp. 52–57. (In Russ.).
20. Nokhrina O.I., Rozhikhina I.D., Kravchenko P.D., Kichigina O.Yu., Kostyuk M.S. *Method of chemical enrichment of polymetallic manganese-containing ores*. Patent RF no.2583224. *Bulleten' izobretenii*. 2016, no. 13. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ольга Ивановна Нохрина, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-8591-1481
E-mail: nvi52@mail.ru

Ирина Дмитриевна Рожихина, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0001-6233-504X
E-mail: rojihina_id@mail.ru

Инна Анатольевна Рыбенко, д.т.н., профессор кафедры прикладных информационных технологий и программирования, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0003-1679-0839
E-mail: rybenkoi@mail.ru

Ol'ga I. Nokhrina, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-8591-1481
E-mail: nvi52@mail.ru

Irina D. Rozhikhina, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0001-6233-504X
E-mail: rojihina_id@mail.ru

Inna A. Rybenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Applied Information Technology and Programming, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0003-1679-0839
E-mail: rybenkoi@mail.ru

Марина Анатольевна Голодова, к.т.н., доцент кафедры архитектуры, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: golodova_ma@mail.ru

Александр Олегович Израильский, магистрант кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: salomon89@mail.ru

Marina A. Golodova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Architecture, Siberian State Industrial University

E-mail: golodova_ma@mail.ru

Aleksandr O. Izrail'skii, MA Student of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University

E-mail: salomon89@mail.ru

Поступила в редакцию 29.06.2020

После доработки 19.10.2020

Принята к публикации 26.10.2020

Received 29.06.2020

Revised 19.10.2020

Accepted 26.10.2020



Оригинальная статья

УДК 504.55.054:622(470.6)

DOI 10.17073/0368-0797-2021-4-282-291



МЕХАНОХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗА ИЗ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ

В. И. Голик¹, Ю. В. Дмитрак¹, Ю. И. Разоренов²,
С. А. Масленников³, В. И. Ляшенко⁴

¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), СКГМИ (ГТУ) (Россия, 362021, Владикавказ (РСО-Алания), ул. Николаева, 44)

² Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова (Россия, 346428, Ростовская обл., Новочеркасск, ул. Просвещения, 132)

³ Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) Донского государственного технического университета (Россия, 346500, Ростовская обл., Шахты, ул. Шевченко, 147)

⁴ Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии (Украина, 52204, Днепропетровская обл., Желтые Воды, Бульвар Свободы, 37)

Аннотация. Описываются результаты исследований по переработке отходов обогащения руд на предприятиях Курской магнитной аномалии (складировано около 1,8 млрд т) с получением металлов и строительных материалов. Существенной особенностью формирования отложенных хвостов обогащения является раскладка хвостов по крупности и удельному весу в водном потоке, поскольку транспортировка хвостов от обогатительной фабрики в хвостохранилище производится гидротранспортом. Представлена характеристика хвостов мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов Лебединского месторождения и методика исследований с использованием лабораторного дезинтегратора DESI-11 (Таллин, Эстония). Применен комплексный метод исследования, включающий системный анализ и научное обобщение, обработку данных с использованием методов статистики и теории вероятности, а также математическое моделирование. Систематизированы результаты выщелачивания хвостов: агитационного в перколяторе, агитационного после активации в дезинтеграторе в сухом состоянии и реагентного выщелачивания в дезинтеграторе. Выполнен регрессионный анализ экспериментальных данных, на основании которого построены графики зависимости извлечения железа от значений переменных факторов процесса. Установлено, что применяемые технологии обогащения ограничены пределом извлечения, результатом которого являются хвосты переработки. Использование хвостов традиционными технологиями экономически не эффективно, а модернизация процессов обогащения целесообразна путем применения гидрометаллургической и химической технологии. Показано, что перспективным направлением извлечения металлов из отходов горной промышленности является комбинирование технологий переработки на основе сочетания возможностей одновременно химического обогащения и активации в дезинтеграторе. Определено, что механохимическая активация хвостов обогащения в дезинтеграторе одновременно с выщелачиванием позволяет существенно увеличить извлечение при том, что время переработки сокращается на два порядка. Рекомендуемая технология может быть востребована на предприятиях различных отраслей промышленности при перспективе перехода к подземной добыче.

Ключевые слова: железистые кварциты, хвосты обогащения, металл, магнитная сепарация, исследование, дезинтегратор

Для цитирования: Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Разоренов Ю.И., Масленников С.А., Ляшенко В.И. Механохимическая технология извлечения железа из хвостов обогащения // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 4. С. 282–291.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-282-291>

Original article

MECHANOCHEMICAL TECHNOLOGY OF IRON EXTRACTION FROM ENRICHMENT TAILINGS

V. I. Golik¹, Yu. V. Dmitrak¹, Yu. I. Razorenov²,
S. A. Maslennikov³, V. I. Lyashenko⁴

¹ North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University) (44 Nikolaeva Str., Vladikavkaz, Republic of North Ossetia – Alania 362021, Russian Federation)

² Platov South-Russian State Polytechnic University (132 Prosveshcheniya Str., Novocherkassk, Rostov Region 346428, Russian Federation)

³ Institute of Service and Entrepreneurship (branch) of the Don State Technical University (147 Shevchenko Str., Shakhty, Rostov Region 346500, Russian Federation)

⁴ Ukrainian Research and Design Institute of Industrial Technology (37 Svobody Blvd., Zhovti Vody, Dnipropetrovsk Region 52204, Ukraine)

Abstract. The article describes the results of studies on ore dressing waste processing at the enterprises of the Kursk Magnetic Anomaly with production of metals and building materials. About 1.8 billion tons of tailings were stored there. Significant feature of deposits formation is division of tailings by

size and specific gravity in water stream, since tailings are transported from the enrichment plant to the tailing dams by hydrotransport. Characteristics of the tailings from wet magnetic research method was applied, including system analysis and scientific generalization, data processing using methods of statistics, probability theory and mathematical modeling. The authors have systematized the results of tailings leaching of following types: agitation leaching in percolator, agitation leaching after activation in disintegrator in the dry state and reagent leaching in disintegrator. Regression analysis of experimental data have been carried out, on the basis of which graphs of dependence of iron extraction on the values of variable process factors were constructed. The used enrichment technologies are limited by extraction limit, which results in processing tailings. The use of these tailings by traditional technologies is not economically efficient, and upgrading of enrichment processes is advisable using hydrometallurgical and chemical technologies. Promising direction in metals extraction from mining waste is combination of processing technologies based on possibilities of both chemical enrichment and activation in disintegrator. It was determined that mechanochemical activation of tailings in disintegrator simultaneously with leaching can significantly increase extraction while the processing time is reduced hundredfold. Recommended technology may be in demand at mining enterprises with the prospect of transition to underground mining.

Keywords: ferruginous quartzites, tailings, metal, magnetic separation, research, disintegrator

For citation: Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Razorenov Yu.I., Maslennikov S.A., Lyashenko V.I. Mechanochemical technology of iron extraction from enrichment tailings. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 282–291. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-282-291>

ВВЕДЕНИЕ

В работах И.Н. Масленицкого, Л.И. Калабина, И.А. Остроушко, В.Я. Мостович и других представлена оценка традиционных методов магнитного, гравитационного и электрохимического обогащения руд и новых методов гидрометаллургии и выщелачивания [1, 2]. Проблемы разработки месторождений Курской магнитной аномалии исследовали В.К. Кушнеренко, В.Н. Анисимов, Е.А. Котенко и другие [3, 4].

Возможности традиционных технологий обогащения ограничены использованием в процессах обогащения преимущественно механической энергии. Модернизация традиционных обогатительных процессов осуществляется путем привлечения иных видов энергии [5, 6]. Альтернативу традиционным технологиям составляют геотехнологические способы обогащения, недостатком которых является продолжительность проникновения раствора в минерал. Перспективно сочетание возможностей химического обогащения и механоактивации в дезинтеграторах [7, 8]. Настоящая работа является продолжением исследований, основные научные и практические результаты которых наиболее полно приведены в работах [9, 10].

Целью настоящей работы является создание технологических основ для разработки эффективной технологии утилизации хвостов горно-обогатительной переработки с получением металлов и компонентов для последующего приготовления твердеющих смесей.

Для исследования были поставлены следующие задачи:

- выполнить математическое и физическое моделирование, а также расчет эффективности извлечения металлов из хвостов обогащения;
- дать оценку результатам агитационного выщелачивания, при котором пульпу из минералов и раствора перемешивали для исключения застойных зон;
- рекомендовать технические средства для использования механохимической технологии извлечения железа из хвостов обогащения.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Комплексный метод исследования включает в себя системный анализ и научное обобщение литературных данных, лабораторный эксперимент, обработку массива данных с использованием методов статистики и теории вероятности, а также математическое моделирование. Основу исследования составляет многофакторный эксперимент с выщелачиванием железа из хвостов обогащения железистых кварцитов Лебединского месторождения [11, 12].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Хвосты обогащения мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов содержат 40 – 80 % фракции менее 0,076 мм при средневзвешенном диам. 0,06 – 0,11 мм и представлены кварцем, магнетитом, гематитом, карбонатами, слюдами, пиритом, ильменитом, силикатами, полевым шпатом и другими минералами. Проба хвостов обогащения для исследования была отобрана в отвале четвертого хранилища Лебединского ГОК [13, 14]. Химический состав пробы хвостов следующий: 64,0 % SiO_2 ; 8,0 % Fe; 5,2 % Al_2O_3 ; 3,2 % Mn; 0,7 % K_2O ; 0,1 % P; 0,8 % Ca; 0,2 % MgO; $5 \cdot 10^{-3}$ % Cu; $4 \cdot 10^{-3}$ % Ni; $5 \cdot 10^{-4}$ % Zn; примерно $(30 \div 50) \cdot 10^{-5}$ % As, Ba, Be, Bi, Co, Cr, Li, Mo, Nb, Pb, Sb, Sn, Sr, Ti, V, Y.

В качестве базы для оценки эффективности извлечения металлов из хвостов обогащения использовали результаты агитационного выщелачивания, при котором пульпу из минералов и раствора перемешивали для исключения застойных зон. Эксперименты осуществляли с использованием лабораторного дезинтегратора DESI-11 (Таллин, Эстония), изготовленного по специальному заказу. Хвосты обогащения измельчали до размеров 2 мм при температуре 60 °C в течение 12 – 24 ч с понижением влажности до 2 %. Результаты агитационного выщелачивания представлены в табл. 1.

Эксперименты осуществлены с использованием математического планирования по плану Венкена – Бокса. Предварительно подготовленный выщелачивающий раствор заданного состава смешивали с хвостами на

Т а б л и ц а 1

Матрица планирования и результаты эксперимента

Table 1. Planning matrix and experiment results

Проба	Содержание в растворе, г/л		Соотношение Ж:Т	Время выщелачивания, ч	Извлечение железа в раствор, %
	H ₂ SO ₄	NaCl			
1	2 (–1)	20 (–1)	4 (–1)	0,250 (–1)	0,40
2	10 (1)	20 (–1)	4 (–1)	0,250 (–1)	3,08
3	2 (–1)	160 (1)	4 (–1)	0,250 (–1)	1,56
4	10 (1)	160 (1)	4 (–1)	0,250 (–1)	3,76
5	2 (–1)	20 (–1)	10 (1)	0,250 (–1)	0,84
6	10 (1)	20 (–1)	10 (1)	0,250 (–1)	3,72
7	2 (–1)	160 (1)	10 (1)	0,250 (–1)	1,84
8	10 (1)	160 (1)	10 (1)	0,250 (–1)	4,35
9	2 (–1)	20 (–1)	4 (–1)	1 (1)	0,45
10	10 (1)	20 (–1)	4 (–1)	1 (1)	3,48
11	2 (–1)	160 (1)	4 (–1)	1 (1)	1,77
12	10 (1)	160 (1)	4 (–1)	1 (1)	4,18
13	2 (–1)	20 (–1)	10 (1)	1 (1)	1,17
14	10 (1)	20 (–1)	10 (1)	1 (1)	3,93
15	2 (–1)	160 (1)	10 (1)	1 (1)	2,55
16	10 (1)	160 (1)	10 (1)	1 (1)	4,75
17	2 (–1)	90 (0)	7 (0)	0,625 (0)	1,64
18	10 (1)	90 (0)	7 (0)	0,625 (0)	3,13
19	6 (0)	20 (–1)	7(0)	0,625 (0)	2,27
20	6 (0)	160 (1)	7 (0)	0,625 (0)	2,58
21	6 (0)	90 (0)	4 (–1)	0,625 (0)	1,53
22	6 (0)	90 (0)	10 (1)	0,625 (0)	2,01
23	6 (0)	90 (0)	7 (0)	0,250 (–1)	2,10
24	6 (0)	90 (0)	7 (0)	1 (1)	2,54

П р и м е ч а н и е. В скобках указаны уровни варьирования независимых переменных: –1, 0, 1.

первом этапе непосредственно перед агитационным выщелачиванием, на втором – после активации выщелачиваемого материала в дезинтеграторе, а на остальных этапах – перед подачей в дезинтегратор [15, 16].

На первом и втором этапах агитационного выщелачивания хвосты с раствором в виде пульпы, полученной добавлением в выщелачивающий раствор активированного материала, или пульпы, полученной при пропускании хвостов с раствором через дезинтегратор, проводили заданное время в агитаторе с постоянной и одинаковой скоростью вращения. На третьем этапе полученную добавление в выщелачивающий раствор хвостов или руды смесь загружали в камеру дезинтегратора. На четвертом этапе аналогично смесь также загружали в рабочую камеру дезинтегратора, после чего выщелачивали заданное время в агитаторе с пос-

тоянной и одинаковой скоростью вращения. На пятом этапе смесь исходных материалов с выщелачивающим раствором пропускали через дезинтегратор заданное количество раз, за счет чего увеличивали время активации [17, 18].

После завершения выщелачивания в экспериментах любого этапа полученную пульпу направляли на исследование качественного состава. В каждом опыте исследовали пять партий хвостов. По каждому виду хвостов переработано по 0,05 т просеянных через сито 2,0 мм хвостов обогащения. Базовое перколяторное выщелачивание осуществляли до достижения фонового содержания независимо от времени. Комбинированная активация продолжается 60 мин.

Эффективность извлечения металлов исследовали сравнением вариантов выщелачивания в перколяторе

Регрессионный анализ экспериментальных данных

Table 2. Regression analysis of experimental data

Уравнение регрессии	Переменные	Показатели и критерии значимости
1. Раскрытие хвостов флотационного обогащения активацией в дезинтеграторе $\varepsilon_1 = 2,095 + 1,231X_1 + 0,444X_2 + 0,275X_3 + 0,176X_4 + 0,290X_1^2 + 0,330X_2^2 - 0,325X_3^2 + 0,225X_4^2 - 0,127X_1X_2 + 0,047X_2X_3 + 0,036X_3X_4$	$X_1 = \frac{C_{H_2SO_4} - 6}{4}; X_2 = \frac{C_{NaCl} - 90}{70};$ $X_3 = \frac{(Ж : Т) - 7}{3}; X_4 = \frac{t - 0,625}{0,375}$	$R^2 = 0,9770;$ $S_{ad} = 0,0673;$ $F = 225,99$
2. Агитационное выщелачивание активированных в дезинтеграторе в сухом состоянии хвостов $\varepsilon_2 = 2,447 + 1,736X_1 + 0,714X_2 + 0,48X_3 + 0,372X_4 + 0,655X_1^2 + 0,705X_2^2 - 0,27X_3^2 + 0,142X_1X_3 + 0,147X_1X_4 + 0,136X_2X_3 + 0,198X_2X_4 + 0,184X_3X_4$	$X_1 = \frac{C_{H_2SO_4} - 6}{4}; X_2 = \frac{C_{NaCl} - 90}{70};$ $X_3 = \frac{t - 0,625}{0,375}; X_4 = \frac{f - 125}{75}$	$R^2 = 0,9540;$ $S_{ad} = 0,3393;$ $F = 75,47$
3. Выщелачивание хвостов в дезинтеграторе $\varepsilon_3 = 3,091 + 2,381X_1 + 1,015X_2 + 0,698X_3 + 0,583X_4 + 1,034X_1^2 + 1,104X_2^2 - 0,276X_3^2 - 0,176X_4^2 + 0,259X_1X_3 - 0,268X_1X_4 + 0,255X_2X_3 + 0,339X_2X_4 + 0,315X_3X_4$	$X_3 = \frac{t - 0,625}{0,375}; X_4 = \frac{f - 125}{75}$	$R^2 = 0,9384;$ $S_{ad} = 1,0111;$ $F = 43,03$

и в дезинтеграторе в течение 60 мин. По результатам опытов устанавливали, как активация хвостов обогащения повышает извлечение металлов из хвостов. Результаты опытов интерпретировали в форме логарифмической или полиномиальной интерполяции. Процесс раскрытия хвостов флотационного обогащения активацией в дезинтеграторе описывали математически [19, 20].

Регрессионный анализ экспериментальных данных приведен в табл. 2 (где $X_1 = 2 \div 10$ г/л – содержание серной кислоты в выщелачивающем растворе; $X_2 = 20 \div 160$ г/л – содержание хлорида натрия в выщелачивающем растворе; X_3 – весовое соотношение массы ($4 \div 10$) выщелачивающего раствора и выщелачиваемой массы (50 г) в единичном эксперименте; $X_4 = 0,15 \div 1,00$ ч – время выщелачивания (t); ε – случайная ошибка; R_2 – коэффициент детерминации; S_{ad} – точность определения оценок коэффициентов регрессии; F – коэффициент детерминации).

На основе анализа регрессионной зависимости построен график изменения извлечения металла от содержания реагентов. Факторы «соотношение Ж:Т» и «скорость вращения роторов дезинтегратора» при этом устанавливаются на нулевом уровне. График изменения извлечения металла от продолжительности выщелачивания и «соотношения Ж:Т» при нулевом уровне факторов скорости вращения дисков дезинтегратора, содержания серной кислоты и соли представлен на рис. 1.

Результаты агитационного выщелачивания активированных в дезинтеграторе в сухом состоянии хвостов сведены в табл. 3. На основании полученной регрессионной зависимости построен график изменения из-

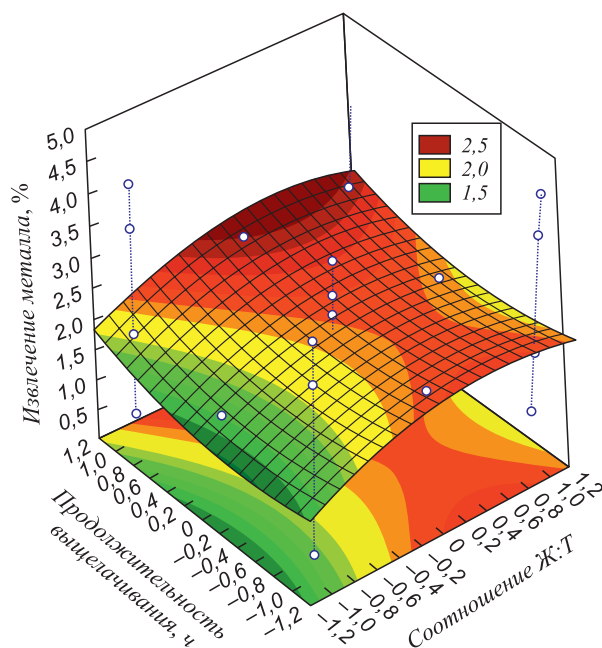


Рис. 1. Зависимости извлечения металла от продолжительности выщелачивания и соотношения Ж:Т

Fig. 1. Dependence of metal extraction on leaching duration and W:T ratio

Матрица планирования и результаты эксперимента при выщелачивании активированных в сухом состоянии хвостов

Table 3. Planning matrix and experiment results at leaching of dry activated tailings

Проба	Содержание в растворе, г/л		Соотношение Ж:Т	Время выщелачивания, ч	Извлечение железа в раствор, %
	H ₂ SO ₄	NaCl			
1	2 (–1)	20 (–1)	0,250 (–1)	50 (–1)	0,40
2	10 (1)	20 (–1)	0,250 (–1)	50 (–1)	4,00
3	2 (–1)	160 (1)	0,250 (–1)	50 (–1)	2,03
4	10 (1)	160 (1)	0,250 (–1)	50 (–1)	4,89
5	2 (–1)	20 (–1)	1 (1)	50 (–1)	1,09
6	10 (1)	20 (–1)	1 (1)	50 (–1)	4,84
7	2 (–1)	160 (1)	1 (1)	50 (–1)	2,39
8	10 (1)	160 (1)	1 (1)	50 (–1)	5,66
9	2 (–1)	20 (–1)	0,250 (–1)	200 (1)	0,59
10	10 (1)	20 (–1)	0,250 (–1)	200 (1)	4,52
11	2 (–1)	160 (1)	0,250 (–1)	200 (1)	2,30
12	10 (1)	160 (1)	0,250 (–1)	200 (1)	5,43
13	2 (–1)	20 (–1)	1 (1)	200 (1)	1,52
14	10 (1)	20 (–1)	1 (1)	200 (1)	5,11
15	2 (–1)	160 (1)	1 (1)	200 (1)	3,32
16	10 (1)	160 (1)	1 (1)	200 (1)	8,50
17	2 (–1)	90 (0)	0,625 (0)	125 (0)	2,13
18	10 (1)	90 (0)	0,625 (0)	125 (0)	4,07
19	6 (0)	20 (–1)	0,625 (0)	125 (0)	2,95
20	6 (0)	160 (1)	0,625 (0)	125 (0)	3,35
21	6 (0)	90 (0)	0,250 (–1)	125 (0)	1,99
22	6 (0)	90 (0)	1 (1)	125 (0)	2,36
23	6 (0)	90 (0)	0,625 (0)	50 (–1)	2,10
24	6 (0)	90 (0)	0,625 (0)	200 (1)	2,80

Пр и м е ч а н и е. В скобках указаны уровни варьирования независимых переменных: –1, 0, 1.

влечения металла от содержания реагентов. Факторы «соотношение Ж:Т» и «скорость вращения роторов дезинтегратора» установлены на нулевом уровне.

Графики изменения зависимости извлечения металла от содержания хлорида натрия и серной кислоты при нулевом уровне факторов скорости вращения дисков дезинтегратора, продолжительности выщелачивания и «соотношения Ж:Т» представлены на рис. 2 и от содержания хлорида натрия и скорости вращения дисков дезинтегратора – на рис. 3.

Результаты выщелачивания хвостов в дезинтеграторе сведены в табл. 4. Учитывая малое содержание сопутствующих металлов, их концентрация в растворах повышается упариванием растворов или осаждением комплексного геля из растворов содой с переводом металлов в нерастворимую форму [21, 22].

Экономическое значение работы заключается в обосновании возможности вовлечения в хозяйственный оборот отходов горного производства с получением прибыли за счет реализации товарной продукции. В будущем можно прогнозировать развитие исследований в направлении повышения извлечения металлов из отходов горного производства [23, 24].

Для переработки техногенных отходов (хвостов обогащения) в настоящей работе рекомендуется создавать новые технологии, основанные на последних достижениях науки и техники с использованием механохимической технологии извлечения железа из хвостов обогащения геотехнологий и дезинтеграторов типа ДУ-65 (Таллин, Эстония). Реализация эффективных методов извлечения металлов из таких отходов позволит улучшить экологическую обстановку в районах

Результаты выщелачивания хвостов в дезинтеграторе

Table 4. Results of tailings leaching in a disintegrator

Проба	Содержание в выщелачивающем растворе, г/л		Скорость вращения роторов дезинтегратора, Гц	Время выщелачивания, ч	Извлечение железа в производственный раствор, %
	H ₂ SO ₄	NaCl			
1	2 (–1)	20 (–1)	50 (–1)	0,250 (–1)	0,50
2	10 (1)	20 (–1)	50 (–1)	0,250 (–1)	5,33
3	2 (–1)	160 (1)	50 (–1)	0,250 (–1)	2,67
4	10 (1)	160 (1)	50 (–1)	0,250 (–1)	6,50
5	2 (–1)	20 (–1)	200 (1)	0,250 (–1)	1,45
6	10 (1)	20 (–1)	200 (1)	0,250 (–1)	6,44
7	2 (–1)	160 (1)	200 (1)	0,250 (–1)	3,18
8	10 (1)	160 (1)	200 (1)	0,250 (–1)	7,53
9	2 (–1)	20 (–1)	50 (–1)	1 (1)	0,78
10	10 (1)	20 (–1)	50 (–1)	1 (1)	6,02
11	2 (–1)	160 (1)	50 (–1)	1 (1)	3,06
12	10 (1)	160 (1)	50 (–1)	1 (1)	7,23
13	2 (–1)	20 (–1)	200 (1)	1 (1)	2,02
14	10 (1)	20 (–1)	200 (1)	1 (1)	6,80
15	2 (–1)	160 (1)	200 (1)	1 (1)	4,41
16	10 (1)	160 (1)	200 (1)	1 (1)	12,50
17	2 (–1)	90 (0)	125 (0)	0,625 (0)	2,84
18	10 (1)	90 (0)	125 (0)	0,625 (0)	5,41
19	6 (0)	20 (–1)	125 (0)	0,625 (0)	3,93
20	6 (0)	160 (1)	125 (0)	0,625 (0)	4,46
21	6 (0)	90 (0)	50 (–1)	0,625 (0)	2,65
22	6 (0)	90 (0)	200 (1)	0,625 (0)	2,98
23	6 (0)	90 (0)	125 (0)	0,250 (–1)	2,28
24	6 (0)	90 (0)	125 (0)	1 (1)	3,55

Пр и м е ч а н и е. В скобках указаны уровни варьирования независимых переменных: –1, 0, 1.

их складирования и обеспечит прирост минерально-сырьевой базы горнодобывающей промышленности [25, 26].

Выполнен регрессионный анализ экспериментальных данных, на основании которого построены графики зависимости извлечения железа от значений переменных факторов процесса. Установлено, что применяемые технологии обогащения ограничены пределом извлечения, результатом которого являются хвосты переработки. Использование хвостов традиционными технологиями экономически не эффективно, а модернизация процессов обогащения целесообразна путем привлечения гидрометаллургической и химической технологий. Показано, что перспективным направлением извлечения металлов из отходов горной промышленности является комбинирование техно-

логий переработки на основе сочетания возможностей одновременно химического обогащения и активации в дезинтеграторе. Определено, что механохимическая активация хвостов обогащения в дезинтеграторе одновременно с выщелачиванием позволяет существенно увеличить извлечение при том, что время переработки сокращается на два порядка. Рекомендуемая технология может быть востребована на предприятиях различных отраслей промышленности при перспективе перехода к подземной добыче.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

ИССЛЕДОВАНИЙ

Основным негативным влиянием горной технологии на окружающую среду и человека являются боль-

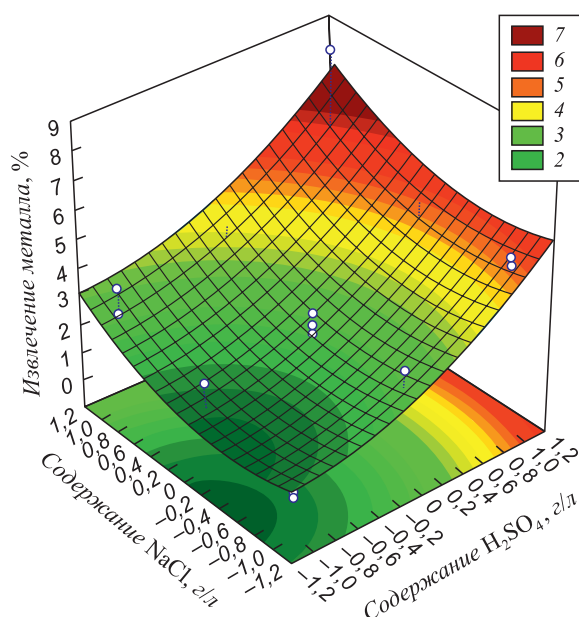


Рис. 2. Зависимости извлечения металла от содержания хлорида натрия и серной кислоты

Fig. 2. Dependence of metal extraction on the content of sodium chloride and sulfuric acid

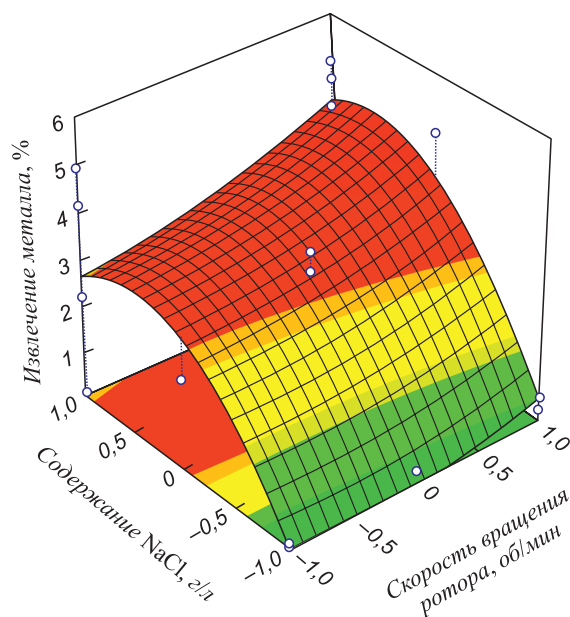


Рис.3. Зависимости извлечения металла от содержания хлорида натрия и скорости вращения дисков дезинтегратора

Fig. 3. Dependences of metal extraction on the content of sodium chloride and the rotation speed of disintegrator disks

шие затраты на обеспечение жизнедеятельности населения, проживающего в зоне влияния горных объектов, отчуждения больших площадей земель из пользования и др. Поэтому предлагается рассмотреть вопрос о целесообразности проведения следующих мероприятий [27, 28]:

- широкое вовлечение в производство техногенных запасов хвостов обогащения руд, а также переработка отвалов забалансовых (по содержанию полезных компонентов) руд на модульных установках;
- рекультивация территории промышленных площадок и прилегающей к ним территории после окончания эксплуатации месторождений полезных ископаемых;
- озеленение рекультивированной территории травяной и кустарниковой растительностью;
- постоянный мониторинг компонентов окружающей среды в зоне влияния горных объектов;
- дистанционное картирование индикаторов опасности территорий на детальном (объектовом) уровне отдельных экологически опасных объектов территории за пределами локаций самих шахтных площадок для сравнения [29, 30].

Выводы

Механохимическая активация хвостов обогащения в дезинтеграторе на два порядка быстрее по сравнению с агитационным выщелачиванием, увеличивает извлечение металлов в раствор на 10 – 25 % в течение одного цикла переработки и может увеличить извлечение при многократной переработке. Выполненные исследования являются шагом в направлении создания высокоэффективной технологии утилизации хвостов обогащения руд с получением металлов и компонентов бетонных смесей, основными достоинствами которой являются возможность утилизации отходов обогащения со временем хранения более 10 лет и получение металлов в количестве от 20 до 60 % от содержания в хвостах. Рекомендуется технология к внедрению на предприятиях горнодобывающих отраслей промышленности, в частности на комбинате «КМА руда» (Яковлевском руднике) с перспективой перехода к подземной добыче на Лебединском, Стойленском, Михайловском и других месторождениях. Феномен активации при обработке в дезинтеграторе подтвержден и в смежных отраслях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Голик В.И., Комашенко В.И. Отходы обогащения железистых кварцитов как сырье для доизвлечения металлов и использования в качестве закладочных смесей // Горный журнал. 2017. № 3. С. 43–47. <http://doi.org/10.17580/gzh.2017.03.08>
2. Голик В.И., Комашенко В.И., Страданченко С.Г., Масленников С.А. Повышение полноты использования недр путем глубокой утилизации отходов обогащения угля // Горный журнал. 2012. № 9. С. 91–95.

1. Golik V.I., Komashchenko V.I. Ferruginous quartzite processing waste as a source of additional metal recovery and backfilling. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 3, pp. 43–47. (In Russ.). <http://doi.org/10.17580/gzh.2017.03.08>
2. Golik V.I., Komashchenko V.I., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Increasing completeness of subsoil use through deep utilization of coal enrichment waste. *Gornyi Zhurnal*. 2012, no. 9, pp. 91–95. (In Russ.).

3. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Страданченко С.Г., Хашева З.М. Принципы и экономическая эффективность комбинирования технологий добычи руд // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 7. С. 6–14.
4. Кощаченко В.И. Эколого-экономическая целесообразность утилизации горнопромышленных отходов с целью их переработки // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2015. № 4. С. 23–30.
5. Каплун Д.Р., Радченко Д.Н. Принципы проектирования и выбор технологий освоения недр, обеспечивающих устойчивое развитие подземных рудников // Горный журнал. 2017. № 11. С. 121–125. <http://doi.org/10.17580/gzh.2017.11.10>
6. Эпов М.И., Юркевич Н.В., Бортникова С.Б., Карин Ю.Г., Саева О.П. Определение состава горно-рудных отходов геохимическими и геофизическими методами (на примере хвостохранилища Салаирского горно-обогатительного комбината) // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 12. С. 1543–1552. <http://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.11.014>
7. Крупская Л.Т., Голубев Д.А., Растиани Н.К., Филатова М.Ю. Рекультивация поверхности хвостохранилища закрытого горного предприятия Приморского края с использованием биоремедиации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. Т. 2019. № 9. С. 138–148. <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-09-0-138-148>
8. Волков Е.П., Анушенков А.Н. Разработка технологии закладки горных выработок твердеющими смесями на основе хвостов обогащения // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 7. С. 5–13. <http://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-7-5-13>
9. Ляшенко В.И., Голик В.И., Дятчин В.З. Складирование хвостов обогащения в виде твердеющих масс в подземном выработанном пространстве и хвостохранилище // Обогащение руд. 2020. Т. 2020. № 1. С. 41–47. <http://doi.org/10.17580/or.2020.01.08>
10. Ляшенко В.И., Голик В.И., Дятчин В.З. Повышение экологической безопасности при снижении техногенной нагрузки в горнодобывающих регионах // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 7. С. 529–538. <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-7-529-538>
11. Гавришев С.Е., Корнилов С.Н., Пыталев И.А., Гапонова И.В. Повышение экономической эффективности горнодобывающих предприятий за счет вовлечения в эксплуатацию техногенных георесурсов // Горный журнал. 2017. № 12. С. 46–51. <http://doi.org/10.17580/gzh.2017.12.09>
12. Kayri M. Predictive abilities of Bayesian regularization and Levenberg – Marquardt algorithms in artificial neural networks: A comparative empirical study on social data // Mathematical and Computational Applications. 2016. Vol. 21. No. 2. Article 21020020. <http://doi.org/10.3390/mca21020020>
13. Modaihsh A.S., Mahjoub M.O., Nadeem M.E.A., Ghoneim A.M., Al-Barakah F.N. The air quality, characterization of polycyclic aromatic hydrocarbon, organic carbon, and diurnal variation of particulate matter over Riyadh City // Journal of Environmental Protection. 2016. No. 7. P. 1198–1209. <http://doi.org/10.4236/jep.2016.79107>
14. Ke X., Zhou X., Wang X., Wang T., Hou H., Zhou M. Effect of tailings fineness on the pore structure development of cemented paste backfill // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 126. P. 345–350. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.052>
15. Yuan Y., Bolan N., PrévotEAU A., Vithanage M., Biswas J.K., Ok Y.S., Wang H. Applications of biochar in redox-mediated reactions // Bioresource Technology. 2017. Vol. 246. P. 271–281. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.154>
16. Beiyuan J., Awad Y.M., Beckers F., Tsang D.C., Ok Y.S., Rinklebe J. Mobility and phytoavailability of As and Pb in a contaminated soil using pine sawdust biochar under systematic change of redox conditions // Chemosphere. 2017. Vol. 178. P. 110–118. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.022>
17. Deng D.Q., Liu L., Yao Z.L., Song K.I., Lao D.Z. A practice of ultra-fine tailings disposal as filling material in a gold mine // Journal of Environmental Management. 2017. Vol. 196. P. 100–109. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.056>
3. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Stradanchenko S.G., Khasheva Z.M. Principles and economic efficiency of ore mining technology combination. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 2015, vol. 326, no. 7, pp. 6–14. (In Russ.).
4. Komashchenko V.I. Ecological and economic feasibility of mining wastes utilization for their processing. *Izvestiya Tul. GU. Nauki o Zemle*. 2015, no. 4, pp. 23–30. (In Russ.).
5. Kaplunov D.R., Radchenko D.N. Design philosophy and choice of technologies for sustainable development of underground mines. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 11, pp. 121–125. (In Russ.). <http://doi.org/10.17580/gzh.2017.11.10>
6. Epov M.I., Yurkevich N.V., Bortnikova S.B., Karin Yu.G., Saeva O.P. Analysis of mine waste by geochemical and geophysical methods (a case study of the mine tailing dump of the Salair ore-processing plant). *Russian Geology and Geophysics*. 2017, vol. 58, no. 12, pp. 1543–1552. <http://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.11.014>
7. Krupskaya L.T., Golubev D.A., Rastanina N.K., Filatova M.Yu. Reclamation of tailings storage surface at a closed mine in the Primorsky Krai by bio remediation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019, vol. 2019, no. 9, pp. 138–148. (In Russ.). <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-09-0-138-148>
8. Volkov E.P., Anushenkov A.N. Developing the technology of mine stowing with processing tailings based hardening blends. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 2019, no. 7, pp. 5–13. (In Russ.). <http://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-7-5-13>
9. Lyashenko V.I., Golik V.I., Dyatchin V.Z. Storage of tailings in the form of a hardened mass in underground mined-out spaces and tailings facilities. *Obogashchenie rud*. 2020, vol. 2020, no. 1, pp. 41–47. (In Russ.). <http://doi.org/10.17580/or.2020.01.08>
10. Lyashenko V.I., Golik V.I., Dyatchin V.Z. Increasing environmental safety by reducing technogenic load in mining regions. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 7, pp. 529–538. (In Russ.). <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-7-529-538>
11. Gavrishev S.E., Kornilov S.N., Pytalev I.A., Gaponova I.V. Enhancing mine production efficiency through waste management. *Gornyi zhurnal*. 2017, no. 12, pp. 46–51. (In Russ.). <http://doi.org/10.17580/gzh.2017.12.09>
12. Kayri M. Predictive abilities of Bayesian regularization and Levenberg – Marquardt algorithms in artificial neural networks: A comparative empirical study on social data. *Mathematical and Computational Applications*. 2016, vol. 21, no. 2, article 21020020. <http://doi.org/10.3390/mca21020020>
13. Modaihsh A.S., Mahjoub M.O., Nadeem M.E.A., Ghoneim A.M., Al-Barakah F.N. The air quality, characterization of polycyclic aromatic hydrocarbon, organic carbon, and diurnal variation of particulate matter over Riyadh City. *Journal of Environmental Protection*. 2016, no. 7, pp. 1198–1209. <http://doi.org/10.4236/jep.2016.79107>
14. Ke X., Zhou X., Wang X., Wang T., Hou H., Zhou M. Effect of tailings fineness on the pore structure development of cemented paste backfill. *Construction and Building Materials*. 2016, vol. 126, pp. 345–350. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.052>
15. Yuan Y., Bolan N., PrévotEAU A., Vithanage M., Biswas J.K., Ok Y.S., Wang H. Applications of biochar in redox-mediated reactions. *Bioresource Technology*. 2017, vol. 246, pp. 271–281. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.154>
16. Beiyuan J., Awad Y.M., Beckers F., Tsang D.C., Ok Y.S., Rinklebe J. Mobility and phytoavailability of As and Pb in a contaminated soil using pine sawdust biochar under systematic change of redox conditions. *Chemosphere*. 2017, vol. 178, pp. 110–118. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.022>
17. Deng D.Q., Liu L., Yao Z.L., Song K.I., Lao D.Z. A practice of ultra-fine tailings disposal as filling material in a gold mine. *Journal of Environmental Management*. 2017, vol. 196, pp. 100–109. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.056>

18. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production // *Waste Management*. 2017. Vol. 61. P. 40–57. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.019>
19. Cheng Y., Jiang H., Zhang X., Cui J., Song C., Li X. Effects of coal rank on physicochemical properties of coal and on methane adsorption // *International Journal of Coal Science and Technology*. 2017. Vol. 4. No. 2. P. 129–146. <http://doi.org/10.1007/s40789-017-0161-6>
20. Paul A., Murthy V.M.S.R., Prakash A.K. Estimation of rock load in development workings of underground coal mines. A modified RMR approach // *Current Science*. 2018. Vol. 114. No. 10. P. 2167–2174. <http://doi.org/10.18520/cs/v114/i10/2167-2174>
21. Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Kanukov A.S., Maisuradze M.V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory // *International Journal of Geomate*. 2016. Vol. 10. No. 1. P. 1693–1697.
22. Chen T., Lei C., Yan B., Xiao X. Metal recovery from the copper sulfide tailing with leaching and fractional precipitation technology // *Hydrometallurgy*. 2014. Vol. 147. P. 178–182. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.05.018>
23. De Oliveira D.M., Sobral L.G.S., Olson G.J., Olson S.B. Acid leaching of a copper ore by sulphur-oxidizing microorganisms // *Hydrometallurgy*. 2014. Vol. 147. P. 223–227. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.05.019>
24. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap leaching technology – Current state, innovations, and future directions: A review // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016. Vol. 37. No. 2. P. 73–119. <http://doi.org/10.1080/08827508.2015.1115990>
25. Mwase J.M., Petersen J., Eksteen J.J. A conceptual flowsheet for heap leaching of platinum group metals (PGMs) from a low-grade ore concentrate // *Hydrometallurgy*. 2012. Vol. 111–112. P. 129–135. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.11.012>
26. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects // *Hydrometallurgy*. 2015. Vol. 157. P. 306–324. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.08.022>
27. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production // *Waste Management*. 2017. Vol. 61. P. 40–57. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.019>
28. Wang G., Li R., Carranza E.J.M., Yang F. 3D geological modeling for prediction of subsurface Mo targets in the Luanchuan district, China // *Ore Geology Reviews*. 2015. Vol. 71. P. 592–610. <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.002>
29. Lyashenko V., Khomenko O., Topolnij F., Helevera O. Substantiation of technologies and technical means for disposal of mining and metallurgical waste in mines // *Technology Audit and Production Reserves*. 2020. Vol. 3. No. 3 (53). P. 4–11. <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.200897>
30. Станкевич С.А., Дудар Т.В., Свиденюк М.О. Застосування багаточасової радарної інтерферометрії для виявлення зміщення земної поверхні для території урановидобування в Україні // *Екологічна безпека*. 2019. Т. 28. № 2. С. 18–23. <http://doi.org/10.30929/2073-5057.2019.2.18-23>
18. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production. *Waste Management*. 2017, vol. 61, pp. 40–57. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.019>
19. Cheng Y., Jiang H., Zhang X., Cui J., Song C., Li X. Effects of coal rank on physicochemical properties of coal and on methane adsorption. *International Journal of Coal Science and Technology*. 2017, vol. 4, no. 2, pp. 129–146. <http://doi.org/10.1007/s40789-017-0161-6>
20. Paul A., Murthy V.M.S.R., Prakash A.K. Estimation of rock load in development workings of underground coal mines. A modified RMR approach. *Current Science*. 2018, vol. 114, no. 10, pp. 2167–2174. <http://doi.org/10.18520/cs/v114/i10/2167-2174>
21. Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Kanukov A.S., Maisuradze M.V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory. *International Journal of Geomate*. 2016, vol. 10, no. 1, pp. 1693–1697.
22. Chen T., Lei C., Yan B., Xiao X. Metal recovery from the copper sulfide tailing with leaching and fractional precipitation technology. *Hydrometallurgy*. 2014, vol. 147, pp. 178–182. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.05.018>
23. De Oliveira D.M., Sobral L.G.S., Olson G.J., Olson S.B. Acid leaching of a copper ore by sulphur-oxidizing microorganisms. *Hydrometallurgy*. 2014, vol. 147, pp. 223–227. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.05.019>
24. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap leaching technology – Current state, innovations, and future directions: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016, vol. 37, no. 2, pp. 73–119. <http://doi.org/10.1080/08827508.2015.1115990>
25. Mwase J.M., Petersen J., Eksteen J.J. A conceptual flowsheet for heap leaching of platinum group metals (PGMs) from a low-grade ore concentrate. *Hydrometallurgy*. 2012, vol. 111–112, pp. 129–135. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.11.012>
26. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy*. 2015, vol. 157, pp. 306–324. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.08.022>
27. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production. *Waste Management*. 2017, vol. 61, pp. 40–57. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.019>
28. Wang G., Li R., Carranza E.J.M., Yang F. 3D geological modeling for prediction of subsurface Mo targets in the Luanchuan district, China. *Ore Geology Reviews*. 2015, vol. 71, pp. 592–610. <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.002>
29. Lyashenko V., Khomenko O., Topolnij F., Helevera O. Substantiation of technologies and technical means for disposal of mining and metallurgical waste in mines. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020, vol. 3, no. 3 (53), pp. 4–11. <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.200897>
30. Stankevich S.A., Dudar T.V., Svidenyuk M.O. Stagnation of bagatoch radar interferometry for detecting the change of the earth's surface for the territory of uranium production in Ukraine. *Ecological Safety*. 2019, vol. 28, no. 2, pp. 18–23. (In Ukr.). <http://doi.org/10.30929/2073-5057.2019.2.18-23>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Иванович Голик, д.т.н., профессор кафедры «Горное дело», Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)

ORCID: 0000-0002-1181-8452

E-mail: v.i.golik@mail.ru

Юрий Витальевич Дмитрак, д.т.н., профессор, ректор, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)

ORCID: 0000-0003-1278-4845

E-mail: dmitrak@yandex.ru

Vladimir I. Golik, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Mining Engineering, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)

ORCID: 0000-0002-1181-8452

E-mail: v.i.golik@mail.ru

Yurii V. Dmitrak, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)

ORCID: 0000-0003-1278-4845

E-mail: dmitrak@yandex.ru

Юрий Иванович Разоренов, д.т.н., профессор, ректор, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова
ORCID: 0000-0001-8171-0749
E-mail: yiri1963@mail.ru

Станислав Александрович Масленников, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Строительство и техносферная безопасность», Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) Донского государственного технического университета
E-mail: maslennikovsa@mail.ru

Василий Иванович Ляшенко, к.т.н., старший научный сотрудник, начальник научно-исследовательского отдела, Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии
E-mail: vilyashenko2017@gmail.com

Yurii V. Razorenov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, Platov South-Russian State Polytechnic University
ORCID: 0000-0001-8171-0749
E-mail: yiri1963@mail.ru

Stanislav A. Maslennikov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair of Construction and Technosphere Safety, Institute of Service and Entrepreneurship (branch) of the Don State Technical University
E-mail: maslennikovsa@mail.ru

Vasilii I. Lyashenko, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Head of Research Department, Ukrainian Research and Design Institute of Industrial Technology
E-mail: vilyashenko2017@gmail.com

Поступила в редакцию 17.02.2020
 После доработки 27.02.2020
 Принята к публикации 02.03.2020

Received 17.02.2020
 Revised 27.02.2020
 Accepted 02.03.2020



Оригинальная статья

УДК 504.06

DOI 10.17073/0368-0797-2021-4-292-301



ВЛИЯНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ НА КАЧЕСТВО АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА КАК ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ. СООБЩЕНИЕ 1

О. В. Глушакова, О. П. Черникова

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

Аннотация. Основные положения Концепции устойчивого развития, сформулированные в 1992 г. на конференции в Рио-де-Жанейро, базирующиеся на триаде экономическая – экологическая – социальная устойчивость, приняты за основу развития большинством стран мира. За прошедший период сформированы институциональные рамки в области устойчивого развития как на межгосударственном уровне, так и на уровне конкретных государств. Снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха – одна из ключевых задач, решение которой необходимо для достижения целей в области устойчивого развития до 2030 г., сформулированных ООН. Несмотря на принятие в России Концепции перехода к устойчивому развитию еще в 1996 г., фокусирование внимания на экологической компоненте потребовало длительного времени. Рассмотрены этапы развития в России регуляторной среды, направленной на обеспечение устойчивого развития и снижения уровня загрязнения атмосферного воздуха. Выявлено, что существенное расширение нормативно-правового поля в указанной области произошло только в 2017 – 2019 гг. Во многом это связано с ориентацией России на достижение целей в области устойчивого развития до 2030 г. и принятием национальных целей развития России. Установлено, что несмотря на использование таких финансовых механизмов для достижения целей устойчивости, как государственная программа Российской Федерации «Охрана окружающей среды» и национальный проект «Экология», доля расходов на охрану окружающей среды в общем объеме расходов федерального бюджета в 2019 г. составила всего лишь 1,3 %. В настоящее время в Российской Федерации в 12 городах уровень загрязнения атмосферного воздуха оценивается как высокий и очень высокий. В семи из них функционируют предприятия черной металлургии, оказывающие существенное антропогенное давление на окружающую среду.

Ключевые слова: цели устойчивого развития, уровень загрязнения, качество атмосферного воздуха, выбросы загрязняющих веществ, развитие регуляторной среды, финансовые механизмы, предприятия черной металлургии

Для цитирования: Глушакова О.В., Черникова О.П. Влияние предприятий черной металлургии на качество атмосферного воздуха как экологической составляющей устойчивого развития территорий. Сообщение 1 // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 4. С. 292–301. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-292-301>

Original article

INFLUENCE OF FERROUS METALLURGY ENTERPRISES ON ATMOSPHERIC AIR QUALITY AS AN ECOLOGICAL COMPONENT OF TERRITORIES SUSTAINABLE DEVELOPMENT. REPORT 1

O. V. Glushakova, O. P. Chernikova

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

Abstract. The main provisions of the Concept of Sustainable Development, formulated in 1992 at the conference in Rio de Janeiro, based on the economy – environment – society sustainability triad, are accepted as the basis for development by most countries. Over the past period, an institutional framework for sustainable development has been formed both at the international level and at the level of states. Reducing level of air pollution is one of the key tasks, solution of which is necessary to achieve the 2030 Sustainable Development Goals stated by the United Nations. Despite adoption of the Concept of Transition to Sustainable Development in Russia back in 1996, focus on environmental component took a long time to be made. The article considers the stages of regulatory environment development aimed at ensuring sustainable development and reducing level of air pollution in Russia. It was revealed that a significant expansion of the regulatory and legal field in this area occurred only in 2017 – 2019. In many ways, this is due to Russia's orientation towards achieving the 2030 Sustainable Development Goals stated by the UN, and adoption of the national development goals of the Russian Federation. It was found that despite the use of such financial mechanisms as the state program of the Russian Federation “Environmental Protection” and the national project “Ecology” to achieve sustainability goals, the share of environmental protection expenditures in total expenditures of the federal budget in 2019 was only 1.3 %. At present, in twelve cities of the Russian

Federation, level of air pollution is assessed as high and very high. In seven of them, ferrous metallurgy enterprises operate, which exert significant anthropogenic pressure on the environment.

Keywords: sustainable development goals, pollution level, air quality, pollutants emissions, development of the regulatory environment, financial mechanisms, ferrous metallurgy enterprises

For citation: Glushakova O.V., Chernikova O.P. Influence of ferrous metallurgy enterprises on atmospheric air quality as an ecological component of territories sustainable development. Report 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 292–301. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-292-301>

ВВЕДЕНИЕ

На конференции ООН, проходившей в 1992 г. в Рио-де-Жанейро, были сформулированы основные положения Концепции устойчивого развития, базирующиеся на триаде экономическая – экологическая – социальная устойчивость. Начиная с этого момента, идея устойчивого развития выступила мощным импульсом не только для политических и научных дискуссий, но и побудила правительства многих стран к конкретным действиям, направленным на обеспечение сбалансированности экономических, экологических и социальных процессов. Принятие Концепции было обусловлено не только нарастанием социальной и экономической стратификации общества, но и непомерным усилением антропогенного давления на окружающую среду.

Достижение целей устойчивости потребовало установления определенных институциональных рамок как на межгосударственном уровне, так и на уровне конкретных государств.

К базовым международным документам для правительств стран, органов власти и бизнеса относятся:

- глобальный договор ООН; Цели ООН в области устойчивого развития, изложенные в Повестке дня в области устойчивого развития на период до 2030 г.;
- руководящие принципы ООН по вопросам предпринимательской деятельности и прав человека;
- всеобщая декларация прав человека;
- декларация ООН о правах коренных народов;
- стандарты GRI (Global Reporting Initiative) в области устойчивого развития в целях формирования корпоративной нефинансовой отчетности.

В рекомендациях GRI по составлению корпоративной социальной отчетности, отражающей показатели результативности взаимодействия с обществом, в частности, говорится о том, что стадии функционирования организации, такие как приход (в регион), осуществление деятельности и уход (из региона) несут существенные воздействия на устойчивость определенной (географической) области. В связи с этим важно иметь характеристику, отражающую подход организации, используемый для систематического управления своими воздействиями, как отрицательными, так и положительными, в тех местных сообществах, где она осуществляет свою деятельность [1].

Содержание политики устойчивого развития промышленных предприятий определяется соот-

ветствующими отраслевыми ассоциациями. Так, предприятия черной металлургии руководствуются в своей деятельности Политикой устойчивого развития Всемирной ассоциации производителей стали (World Steel)¹, серий индексов FTSE4Good, которые предназначены для измерения эффективности компаний, демонстрирующих сильные практики в области охраны окружающей среды, социальной сферы и управления, и выступают в качестве финансовых инструментов на фондовом рынке. В своей деятельности крупные промышленные компании, города, штаты, регионы и инвесторы также используют глобальную систему раскрытия информации Garbon Disclosure Project (GDP) для управления своими воздействиями на окружающую среду.

В «Повестке дня в области устойчивого развития на период до 2030 г.» сформулированы 17 целей и соответствующих им 169 задач [2]. Так, достижение Цели устойчивого развития 3 (ЦУР 3) «Обеспечение здорового образа жизни и содействие благополучию для всех в любом возрасте» предусматривает решение такой задачи, как снижение смертности от загрязнения воздуха в жилых помещениях и атмосферного воздуха. В свою очередь в рамках ЦУР 11 «Обеспечение открытости, безопасности, жизнестойкости и экологической устойчивости городов и населенных пунктов» сформулирована задача уменьшения к 2030 г. негативного экологического воздействия городов в пересчете на душу населения, в том числе посредством уделения особого внимания качеству воздуха и удалению городских и других отходов».

В 2019 г. на политическом форуме высокого уровня по устойчивому развитию при подведении промежуточных итогов в области достижения целей устойчивого развития до 2030 г. Генеральным секретарем ООН было отмечено, что загрязнение воздуха как в окружающей среде, так и в быту стало причиной смерти в 2016 г. порядка 7 млн человек по всему миру. В этот период времени девять из десяти человек, живущих в городах, продолжали дышать воздухом, который не отвечал установленным Всемирной организацией здравоохранения нормам качества воздуха по содержанию в нем твердых частиц. Для среднегодовой концентрации в воздухе твердых частиц диам. 2,5 мкм и менее

¹ Всемирная ассоциация производителей стали проводит оценку по восьми основным и семи дополнительным параметрам, оценивая экологическую, социальную и экономическую устойчивость компаний.

($PM_{2,5}$) не допускается превышение порогового уровня в 10 мкг/м^3 , а среднесуточная концентрация не должна превышать 25 мкг/м^3 .

На качество атмосферного воздуха наиболее существенное влияние оказывают стационарные источники, к которым относятся промышленные предприятия и предприятия теплоэнергетики, а также автомобильный транспорт. Ежегодные отчеты Global Energy Statistical Yearbook [3] свидетельствуют о росте объема выбросов оксида CO_2 в результате сжигания различных видов топлива (нефти, природного газа, угля, лигнита) (табл. 1). В 2018 г. лидерами по этому

показателю выступили Китай, США, Индия, Россия, Япония, доля которых в совокупном объеме выбросов CO_2 составила 28,75, 15,54, 6,91, 5,33, 3,72 %.

Существенный вклад в загрязнение атмосферного воздуха вносит такой вид экономической деятельности по классификации Рамочной конвенции ООН (Framework Convention on Climate Change, UN FCCC) «Промышленные процессы и использование продукции», в котором в 2017 г. наиболее значительным источником выбросов оставалась металлургия. Ее вклад в суммарный выброс парниковых газов в промышленности составил 46,3 % [4].

Т а б л и ц а 1

Динамика выбросов оксида CO_2 в атмосферный воздух в некоторых странах и в мире с 1990 по 2018 гг.*

Table 1. Dynamics of CO_2 oxide emissions into atmospheric air in selected countries and in the world from 1990 to 2018*

Год	Величина выбросов, т					
	Китай	США	Индия	Россия	Япония	Мир
1990	2261,02	4851,11	522,39	2193,07	1048,96	20 313,3
1991	2376,69	4803,24	561,61	2199,36	1056,75	20 465,7
1992	2467,35	4882,73	592,94	2045,97	1068,27	20 422,9
1993	2646,39	5006,27	623,96	1860,72	1061,34	20 517,4
1994	2765,43	5079,20	664,30	1634,70	1111,74	20 596,7
1995	2963,72	5132,03	722,85	1594,41	1123,05	21 081,4
1996	2958,43	5301,06	757,83	1574,70	1133,37	21 566,6
1997	2987,54	5548,03	790,54	1482,28	1122,81	21 911,5
1998	3082,21	5611,05	806,76	1463,65	1084,18	22 061,6
1999	2998,45	5664,82	870,78	1505,29	1121,06	22 222,2
2000	3144,36	5809,10	908,48	1524,76	1134,37	22 838,4
2001	3279,03	5753,81	921,36	1531,23	1122,91	23 154,3
2002	3538,51	5651,60	951,41	1514,46	1168,15	23 523,6
2003	4114,55	5714,37	975,41	1555,15	1176,58	24 580,0
2004	4843,13	5794,85	1032,04	1553,00	1167,05	25 710,7
2005	5470,03	5809,49	1079,86	1550,82	1170,59	26 643,4
2006	6052,90	5696,43	1151,24	1611,73	1146,73	27 469,6
2007	6514,01	5801,86	1247,60	1591,59	1185,05	28 429,0
2008	6707,23	5589,45	1324,97	1611,93	1109,43	28 605,9
2009	7220,97	5194,58	1489,35	1512,39	1052,58	28 319,6
2010	7762,56	5430,30	1575,07	1609,80	1099,63	29 850,7
2011	8490,94	5221,46	1663,21	1682,60	1153,33	30 659,9
2012	8753,73	5033,21	1797,48	1666,07	1197,97	31 135,5
2013	9167,20	5133,44	1840,75	1610,85	1217,67	31 719,1
2014	9081,57	5176,43	2001,67	1598,72	1176,51	31 757,4
2015	9061,26	5033,93	2013,13	1606,22	1145,87	31 651,6
2016	9003,33	4927,44	2056,93	1582,76	1142,50	31 627,7
2017	9178,94	4962,86	2184,89	1689,05	1141,64	32 298,9
2018	9466,50	5117,77	2276,95	1754,59	1123,04	32 915,9

*Official site Global Energy Statistical Yearbook. URL: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy.html> (дата обращения: 06.10.2020).

Проблемы экологической составляющей устойчивого развития уже долгое время находятся в фокусе внимания российских и зарубежных ученых.

Исследованием потенциальных возможностей стран мира к изменению структуры их экономик в сторону развития экологически чистых производств занимались Р. Mealy, А. Teytelboym [5].

Проблемы публичного управления устойчивым развитием территорий в контексте положений, изложенных в программных документах ООН, рассмотрены в работе [6]. Точка зрения о несоблюдении принципов устойчивого развития промышленными предприятиями в угоду созданию экономических ценностей изложена Н. Hummels, А. Argiou [7]. Вопросами повышения уровня экологической ответственности бизнеса посредством публикации экологических отчетов занимались в работе [8]. Возможность перехода к низкоуглеродному производству металлургической промышленности Китая в целях сокращения выбросов оксида CO_2 в атмосферный воздух, а также эффективность применения для этих целей новых инструментов налогообложения изложены в работах [9–11]. Вклад промышленных предприятий Бразилии в достижение целей устойчивого развития до 2030 г. рассмотрен в работе [12]. Формализованный подход к оценке достижения целей устойчивого развития с использованием индекса инноваций в «зеленой» экономике предложен в работе [13]. Проблемы экологизации городов рассмотрены в работах [14–17]. Результаты научных исследований качества атмосферного воздуха в промышленных городах представлены в работе [18]. Вопросами государственного управления в области охраны атмосферного воздуха занималась А.В. Степанова [19]. Системы мониторинга загрязнения воздуха исследовали в работе [20], индексы качества воздуха представлены в обзоре методов интерпретации состояния качества воздуха [21]. Исследования влияния качества воздуха на текучесть кадров китайских компаний представлены в работе [22]. Проблемы управления устойчивым развитием металлургических предприятий раскрыты в работах [23, 24].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование базируется на диалектическом и институциональном подходах. Диалектический подход позволяет подойти к исследованию процессов и явлений в движении и развитии, а институциональный – выявить этапы развития регуляторной среды, направленной на обеспечение экологической составляющей устойчивого развития территорий и снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха. В процессе изучения и обобщения аналитических материалов профильных органов государственной власти регионального уровня использованы такие методы, как анализ, синтез, сравнение, группировки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В России за 29-летний период с начала трансформационных преобразований сформировано достаточно обширное нормативно-правовое поле в целях охраны окружающей среды (табл. 2).

Начало рассматриваемому процессу было положено в 1996 г., когда Россия продемонстрировала свою приверженность Концепции устойчивого развития, принятой в 1992 г. на конференции ООН в Рио-де-Жанейро. Долгие годы внимание к проблемам загрязнения окружающей среды, в том числе качеству атмосферного воздуха, оставалось на низком уровне.

Доля бюджетных ассигнований по разделу «Охрана окружающей среды» в общем объеме расходов федерального бюджета на протяжении ряда лет составляла не многим более 0,15 – 0,20 % (табл. 3). В бюджетах субъектов РФ в силу перманентной дефицитности большинства из них планирование расходов на охрану окружающей среды также осуществляли по остаточному принципу. Вместе с тем, несмотря на реализацию в России масштабного национального проекта «Экология», доля расходов на охрану окружающей среды в 2019 г. составила всего лишь 1,3 % от общего объема расходов федерального бюджета (табл. 3).

Проблема обеспечения экологической составляющей устойчивого развития территорий в РФ, к сожалению, не решена до сих пор. Хочется верить, что расширение нормативно-правового поля в 2017 – 2019 гг., направленное на решение экологических проблем (табл. 2), окажет реальное регулирующее воздействие на процессы территориального развития. Однако важно понимать, что введение новых институциональных правил как таковых является важным, но не достаточным. Необходимо наличие эффективных механизмов, контролирующих их исполнение.

Из 12 городов России, уровень загрязнения атмосферного воздуха в которых классифицируется как высокий и очень высокий, в семи (Новокузнецке, Нижнем Тагиле, Красноярске, Магнитогорске, Липецке, Череповце, Челябинске) основной вклад в загрязнение атмосферного воздуха вносят предприятия черной металлургии. Методами решения проблем загрязнения атмосферного воздуха выступают: введение с 2019 г. системы квот на объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, создание и введение в эксплуатацию федеральной государственной информационной системы мониторинга качества атмосферного воздуха, а также принятие перечня компенсационных мероприятий в указанных городских округах, направленных на улучшение качества атмосферного воздуха. Финансовыми механизмами снижения уровня загрязнения атмосферного воздуха в крупных промышленных городах выступают государственная программа Российской Федерации «Охрана окружающей среды», национальный проект «Экология», в структуру которого входит

Т а б л и ц а 2

Этапы развития в РФ регуляторной среды, направленной на обеспечение устойчивого развития и снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха с 1996 по 2019 гг.

Table 2. Stages of development of regulatory environment aimed at ensuring sustainable development and reducing level of atmospheric air pollution in the Russian Federation since 1996 to 2019

Год	Наименование нормативного правового акта	Комментарии авторов
1996	О концепции перехода Российской Федерации к устойчивому развитию: Указ Президента РФ от 1 апреля 1996 г. № 440	Обозначена необходимость решения задач по стабилизации экологической ситуации и улучшению состояния окружающей среды за счет экологизации экономической деятельности, широкого распространения экологически ориентированных методов управления
1999	Об охране атмосферного воздуха: Федеральный закон от 04.05.1999 г. № 96-ФЗ (ред. от 26.07.2019 г.)	Введены понятия качества атмосферного воздуха ¹ , гигиенического ² и экологического ³ нормативов качества атмосферного воздуха
2014	Государственная программа Российской Федерации «Охрана окружающей среды»: утв. постановлением Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. № 326	Включает подпрограмму «Регулирование качества окружающей среды», цель которой – снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха в крупных промышленных центрах
2017	О проведении в Российской Федерации Года экологии: Указ Президента РФ от 05.01.2016 № 7 (ред. от 03.09.2016 г.)	В целях привлечения внимания общества к вопросам экологического развития 2017 г. в Российской Федерации объявлен годом экологии
2017	О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 г.: Указ Президента РФ от 19.04.2017 г. № 176	Обозначена проблема проживания порядка 17,1 млн человек (17 % городского населения) в городах с высоким и очень высоким уровнем загрязнения воздуха; ставится задача уменьшения уровня загрязнения атмосферного воздуха в городах и иных населенных пунктах
2018	О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 г.: Указ Президента РФ от 07.05.2018 г. № 204 (ред. от 21.07.2020 г.)	Впервые сформулированы национальные цели развития России; поставлена задача разработать и представить Правительству РФ национальные проекты по обозначенным в Указе направлениям, в том числе по направлению «Экология»
2018	Паспорт национального проекта «Экология» (утв. президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам, протокол от 24.12.2018 г. № 16)	Предусмотрено направление № 2: снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха в крупных промышленных центрах, в том числе уменьшение не менее чем на 20 % совокупного объема выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в наиболее загрязненных городах (целевые показатели: снижение совокупного объема выбросов за отчетный год – до 78 % к 2024 г. по сравнению с базовым 2019 г.; снижение количества городов с высоким и очень высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха с восьми в 2019 г. до нуля в 2024 г.)
2018	Федеральный проект «Чистый воздух» со сроком реализации с 1 октября 2018 г. по 31 декабря 2024 г. (входит в структуру национального проекта «Экология»)	Направлен на реализацию комплексных планов мероприятий по снижению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в крупных промышленных центрах (включая Братск, Красноярск, Липецк, Магнитогорск, Медногорск, Нижний Тагил, Новокузнецк, Норильск, Омск, Челябинск, Череповец, Чита). Ответственность за снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха возложена на соответствующие органы государственной власти субфедерального уровня и юридических лиц – участников проекта

Т а б л и ц а 2 (продолжение)

Год	Наименование нормативного правового акта	Комментарии авторов
2019	Об утверждении плана мероприятий по реализации Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 г.: Распоряжение Правительства РФ от 29.05.2019 г. № 1124-р (ред. от 18.12.2019 г.)	Планом предусмотрено 18 направлений, включающих 50 мероприятий, обозначены результаты и сроки их реализации, определены ответственные федеральные органы государственной власти и другие заинтересованные стороны. В перечень входит направление № 5 «Строительство и модернизация очистных сооружений, а также внедрение технологий, обеспечивающих снижение объема или массы выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух и сбросов загрязняющих веществ в водные объекты», в рамках которого предусмотрено формирование сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха, строительство, реконструкция и модернизация систем очистных сооружений поселений и городских округов, реализация мероприятий, предусмотренных федеральным проектом «Чистый воздух», подготовка предложений по стимулированию использования экологически чистого транспорта
2019	Перечень поручений по реализации Послания Президента Федеральному Собранию (утв. Президентом РФ 27.02.2019 г. № Пр-294)	Правительству РФ совместно с Государственной Думой Федерального Собрания РФ поручено обеспечить принятие федерального закона, предусматривающего применение системы квотирования выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в крупных промышленных центрах, в первую очередь в городских округах (Братске, Красноярске, Липецке, Магнитогорске, Медногорске, Нижнем Тагиле, Новокузнецке, Норильске, Омске, Челябинске, Череповце и Чите)
2019	О проведении эксперимента по квотированию выбросов загрязняющих веществ и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части снижения загрязнения атмосферного воздуха: Федеральный закон от 26.07.2019 № 195-ФЗ	Определены территории согласно Перечня поручений Президента РФ от 27.02.2019 № Пр-294 и сроки проведения эксперимента по квотированию выбросов загрязняющих веществ на основе сводных расчетов ⁴ . Внесены изменения в Федеральный закон от 04.05.1999 г. № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха»
2019	План деятельности Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации на 2019 – 2024 гг. (утв. Минприроды России 28.06.2019 г. № 0010/12) (вместе с «Публичной декларацией целей и задач на 2019 г. Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации», утв. Минприроды России, «Планом-графиком мероприятий по реализации документов стратегического планирования Плана деятельности Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации на 2019 – 2024 гг.», утв. Минприроды России)	Утверждены направления (блоки мероприятий) по снижению уровня загрязнения атмосферного воздуха в крупных промышленных центрах, в том числе в рамках федерального проекта «Чистый воздух», уменьшение количества городов с очень высоким и высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха с восьми в 2019 г. до нуля в 2024 г.
2019	Приказ Минприроды России от 27.11.2019 г. № 805 «О межведомственном совете по проведению эксперимента по квотированию выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух (за исключением радиоактивных веществ) на основании данных сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха»	Принято Положение о Межведомственном совете по проведению эксперимента по квотированию выбросов загрязняющих веществ (за исключением радиоактивных веществ) на основании данных сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха

Т а б л и ц а 2 (продолжение)

Год	Наименование нормативного правового акта	Комментарии авторов
2019	Приказ Минприроды России от 28.11.2019 г. № 811 «Об утверждении требований к мероприятиям по уменьшению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в периоды неблагоприятных метеорологических условий»	Определены требования к мероприятиям по уменьшению выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в периоды неблагоприятных метеорологических условий, а также рекомендован их перечень
2019	Приказ Минприроды России от 29.11.2019 г. № 813 «Об утверждении правил проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха, включая их актуализацию»	Определен порядок организации и проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха
2019	Приказ Минприроды России от 29.11.2019 г. № 814 «Об утверждении правил квотирования выбросов загрязняющих веществ (за исключением радиоактивных веществ) в атмосферный воздух»	Утвержден порядок определения и установления квот выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, установлена необходимость определения квот выбросов по каждому приоритетному загрязняющему веществу
2019	Об утверждении Правил предоставления и распределения иных межбюджетных трансфертов из федерального бюджета бюджетам субъектов Российской Федерации на реализацию мероприятий по снижению совокупного объема выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, снижению уровня загрязнения атмосферного воздуха в крупных промышленных центрах, обеспечивающих достижение целей, показателей и результатов федерального проекта «Чистый воздух» национального проекта «Экология»: Постановление Правительства РФ от 05.12.2019 г. № 1600	Установлены цели, порядок, условия предоставления и распределения иных межбюджетных трансфертов в целях софинансирования расходных обязательств субъектов РФ, возникающих при реализации мероприятий по снижению совокупного объема выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, снижению уровня загрязнения атмосферного воздуха в крупных промышленных центрах; определен перечень субъектов РФ, в бюджеты которых осуществляется предоставление иных межбюджетных трансфертов ⁵
2019	Об утверждении требований к перечню компенсационных мероприятий, направленных на улучшение качества атмосферного воздуха на каждой территории эксперимента по квотированию выбросов на основе сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха: Постановление Правительства РФ от 24.12.2019 г. № 1792	Определен перечень из 13 компенсационных мероприятий; однако мероприятия, связанные с реконструкцией, техническим перевооружением и модернизацией объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, значатся в указанном списке под номером 11. На взгляд авторов являются ключевыми
2019	О создании и эксплуатации федеральной государственной информационной системы мониторинга качества атмосферного воздуха в городских округах (Братске, Красноярске, Липецке, Магнитогорске, Медногорске, Нижнем Тагиле, Новокузнецке, Норильске, Омске, Челябинске, Череповце и Чите): Постановление Правительства РФ от 24.12.2019 г. № 1806	Утверждены Правила создания и эксплуатации федеральной государственной информационной системы мониторинга качества атмосферного воздуха в городских округах (Братске, Красноярске, Липецке, Магнитогорске, Медногорске, Нижнем Тагиле, Новокузнецке, Норильске, Омске, Челябинске, Череповце и Чите)

федеральный проект «Чистый воздух» со сроком реализации с 1 октября 2018 г. по 31 декабря 2024 г., а также региональные проекты.

Выводы

Основные положения Концепции устойчивого развития, сформулированные в 1992 г. на конференции в Рио-де-Жанейро и базирующиеся на триаде экономическая – экологическая – социальная устойчивости, приняты за основу развития большинством стран мира. За период с 1992 по 2020 гг. сформированы институциональные рамки в области устойчивого развития

как на межгосударственном уровне, так и на уровне конкретных государств. В России, несмотря на принятие Концепции перехода к устойчивому развитию еще в 1996 г., фокусирование внимания на экологической компоненте как неотъемлемой составляющей устойчивого развития потребовало длительного времени (порядка двадцати трех лет). Причем существенное расширение нормативно-правового поля, направленное на обеспечение устойчивого развития территорий и снижение уровня загрязнения атмосферного воздуха, произошло в 2017 – 2019 гг. Во многом это связано с ориентацией России на достижение целей в области устойчивого развития до 2030 г. и принятием нацио-

Т а б л и ц а 2 (продолжение)

Год	Наименование нормативного правового акта	Комментарии авторов
2020	О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 г.: Указ Президента РФ от 21.07.2020 г. № 474	Одна из национальных целей до 2030 г. – комфортная и безопасная среда для жизни, достижение которой предусматривает достижение такого целевого показателя, как снижение выбросов опасных загрязняющих веществ, оказывающих наибольшее негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека, в два раза

П р и м е ч а н и е. ¹ – качество атмосферного воздуха – совокупность физических, химических и биологических свойств атмосферного воздуха, отражающих степень его соответствия гигиеническим нормативам качества атмосферного воздуха и экологическим нормативам качества атмосферного воздуха;

² – гигиенический норматив качества атмосферного воздуха – критерий качества атмосферного воздуха, который отражает предельно допустимое максимальное содержание загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и при котором отсутствует вредное воздействие на здоровье человека;

³ – экологический норматив качества атмосферного воздуха – критерий качества атмосферного воздуха, который отражает предельно допустимое максимальное содержание загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и при котором отсутствует вредное воздействие на окружающую среду;

⁴ – эксперимент по квотированию выбросов на основании сводных расчетов в городских округах Российской Федерации (Братске, Красноярске, Липецке, Магнитогорске, Медногорске, Нижнем Тагиле, Новокузнецке, Норильске, Омске, Челябинске, Череповце и Чите) проводится с 01.01.2020 по 31.12.2024 гг.;

⁵ – иные межбюджетные трансферты в целях софинансирования расходных обязательств субъектов РФ, возникающих при реализации мероприятий по снижению совокупного объема выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух предоставляются в бюджеты Забайкальского края, Красноярского края, Кемеровской области – Кузбасса, Вологодской, Иркутской, Липецкой, Омской, Оренбургской, Свердловской, Челябинской областей.

Т а б л и ц а 3

Расходы федерального бюджета по разделу 06 «Охрана окружающей среды» бюджетной классификации расходов РФ за 2008 – 2019 гг. (исполнено)*

*Table 3. Federal budget expenditures under the section 06 “Environmental protection” by budget classification of the Russian Federation expenditures for 2008 – 2019 (executed)**

Год	Расходы федерального бюджета всего, млрд руб.	Расходы федерального бюджета по разделу 06 «Охрана окружающей среды», млрд руб.	Доля расходов по разделу 06 «Охрана окружающей среды» в общем объеме расходов, %
2008	6729,78	10,17	0,15
2009	8686,26	13,04	0,15
2010	9054,67	13,47	0,15
2011	10 925,61	17,56	0,16
2012	11 400,33	22,49	0,19
2013	11 500,73	24,26	0,21
2014	12 618,82	46,37	0,37
2015	15 620,25	49,66	0,31
2016	12 857,95	63,08	0,49
2017	13 587,16	92,36	0,70
2018	13 918,52	115,98	0,83
2019	15 196,29	197,55	1,30

П р и м е ч а н и е. * – официальный сайт Федерального казначейства. Исполнение бюджетов. Федеральный бюджет. URL: <https://roskazna.gov.ru/ispolnenie-byudzheto/federalnyj-byudzheto/> (дата обращения: 15.08.2020).

нальных целей ее развития, финансовыми механизмами достижения которых служат государственная программа Российской Федерации «Охрана окружающей среды», национальный проект «Экология» и входящий в его состав федеральный проект «Чистый воздух». Однако доля расходов федерального бюджета по разделу 06 «Охрана окружающей среды» в общем объеме расходов в 2019 г. составила всего лишь 1,3 %, а за

период с 2008 по 2018 гг. она была еще ниже и варьировалась в пределах от 0,15 до 0,83 %. В настоящее время в Российской Федерации в 12 городах уровень загрязнения атмосферного воздуха оценивается как высокий и очень высокий. В семи из них функционируют предприятия черной металлургии, оказывающие существенное антропогенное давление на окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Показатели взаимодействия с обществом. GRI 2000 – 2006. Version 3.0. 12 с. URL: http://nfotchet.narod2.ru/olderfiles/1/Pokazateli_rezultativnosti_v_oblas-90509.pdf (дата обращения: 09.10.2020).
2. Резолюция 70/1 Генеральной Ассамблеи ООН. URL: https://unctad.org/meetings/en/SessionalDocuments/ares70d1_ru.pdf (дата обращения: 06.10.2020).
3. Global Energy Statistical Yearbook. Official site. URL: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy.html> (дата обращения: 06.10.2020).
4. Официальный сайт Минприроды России. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации». URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2018/ (дата обращения: 25.06.2020 г.).
5. Mealy P., Teytelboym A. Economic complexity and the green economy // *Research Policy*. 2020. Article 103948. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2020.103948>
6. Glushakova O.V., Vaysberg Ya.A., Fadeykina N.V., Mikhailov V.V., Trifonov V.A. Architectonics and strategic architecture of regional public administration systems: Approaches to conformity assessment. In: *The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences EpSBS. CIEDR 2018*. Future Academy. 2019. P. 331–341.
7. Hummels H., Argyrou A. Planetary demands. Redefining sustainable development and sustainable entrepreneurship // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Article 123804. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123804>
8. Черникова О.П., Баранов П.П. Формирование экологической отчетности угледобывающих предприятий // *Горный журнал*. 2018. № 3. С. 82–85. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.03.14>
9. Lin B., Xu M. Good subsidies or bad subsidies? Evidence from low-carbon transition in China's metallurgical industry // *Energy Economics*. 2019. Vol. 83. P. 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.105076>
10. Lin B., Xu M. Exploring the green total factor productivity of China's metallurgical industry under carbon tax: A perspective on factor substitution // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 233. P. 1322–1333. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.137>
11. Du Z., Lin B. Analysis of carbon emissions reduction of China's metallurgical industry // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 176. P. 1177–1184. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.178>
12. Martins V.W.B., Rampasso I.S., Siltori P.F.S., Cazeri G.T., Anholon R., Quelhas O.L.G., Leal Filho W. Contributions from the Brazilian industrial sector to sustainable development // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 272. Article 122762. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122762>
13. Schlör H., Venghaus S., Hake J.-F. Green Economy Innovation Index (GEII) – a normative innovation approach for Germany and its FEW Nexus // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 142. P. 2310–2316. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.159>
14. Григорьев В.А., Огородников И.А. Проблемы экологизации городов в мире, России, Сибири // *Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы*. 2001. № 63. С. 1–152.
1. *Indicators of Interaction with Society. GRI 2000 – 2006*. Version 3.0. 12 p. Available at URL: http://nfotchet.narod2.ru/olderfiles/1/Pokazateli_rezultativnosti_v_oblas-90509.pdf (Accessed 09.10.2020). (In Russ.).
2. *70/1 of the UN General Assembly*. Available at URL: https://unctad.org/meetings/en/SessionalDocuments/ares70d1_ru.pdf (Accessed 06.10.2020). (In Russ.).
3. *Global Energy Statistical Yearbook. Official site*. Available at URL: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy.html> (Accessed 06.10.2020).
4. *State report "On the state and protection of the environment in the Russian Federation."* Official site of the Ministry of Natural Resources of Russia. Available at URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2018/ (Accessed 25.06.2020). (In Russ.).
5. Mealy P., Teytelboym A. Economic complexity and the green economy. *Research Policy*. 2020, article 103948. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2020.103948>
6. Glushakova O.V., Vaysberg Ya.A., Fadeykina N.V., Mikhailov V.V., Trifonov V.A. Architectonics and strategic architecture of regional public administration systems: Approaches to conformity assessment. In: *The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences EpSBS. CIEDR 2018*. Future Academy. 2019, pp. 331–341.
7. Hummels H., Argyrou A. Planetary demands. Redefining sustainable development and sustainable entrepreneurship. *Journal of Cleaner Production*. 2020, article 123804. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123804>
8. Chernikova O.P., Baranov P.P. Environmental reporting in coal mining. *Gornyi Journal*. 2018, no. 3, pp. 82–85. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.03.14>
9. Lin B., Xu M. Good subsidies or bad subsidies? Evidence from low-carbon transition in China's metallurgical industry. *Energy Economics*. 2019, vol. 83, pp. 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.105076>
10. Lin B., Xu M. Exploring the green total factor productivity of China's metallurgical industry under carbon tax: A perspective on factor substitution. *Journal of Cleaner Production*. 2019, vol. 233, pp. 1322–1333. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.137>
11. Du Z., Lin B. Analysis of carbon emissions reduction of China's metallurgical industry. *Journal of Cleaner Production*. 2018, vol. 176, pp. 1177–1184. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.178>
12. Martins V.W.B., Rampasso I.S., Siltori P.F.S., Cazeri G.T., Anholon R., Quelhas O.L.G., Leal Filho W. Contributions from the Brazilian industrial sector to sustainable development. *Journal of Cleaner Production*. 2020, vol. 272, article 122762. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122762>
13. Schlör H., Venghaus S., Hake J.-F. Green Economy Innovation Index (GEII) – a normative innovation approach for Germany and its FEW Nexus. *Energy Procedia*. 2017, vol. 142, pp. 2310–2316. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.159>
14. Grigor'ev V.A., Ogorodnikov I.A. Problems of greening cities in the world, Russia, Siberia. *Ekologiya. Seriya analiticheskikh obzorov mirovoi literatury*. 2001, no. 63, pp. 1–152. (In Russ.).

15. Lin B., Zhu J. Policy effect of the Clean Air Action on green development in Chinese cities // *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol. 258. Article 110036. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110036>
16. Bush J. The role of local government greening policies in the transition towards nature-based cities // *Environmental Innovation and Societal Transitions*. 2020. Vol. 35. P. 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.01.015>
17. Kulińska E., Dendera – Gruszka M. Green cities – problems and solutions in Turkey // *Transportation Research Procedia*. 2019. Vol. 39. P. 242–251. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.026>
18. Клюев Н.Н. Качество атмосферного воздуха российских городов в 1991 – 2016 гг. // *Изв. Российской Академии наук. Серия географическая*. 2019. Т. 9. № 1. С. 14–23. <https://doi.org/10.1134/S2079970519020072>
19. Степанова А.В. Совершенствование государственного управления в области охраны атмосферного воздуха // *Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия: экономика*. 2019. № 2 (28). С. 67–74.
20. Idrees Z., Zheng L. Low cost air pollution monitoring systems: A review of protocols and enabling technologies // *Journal of Industrial Information Integration*. 2019. Vol. 17. Article 100123. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2019.100123>
21. Suman. Air quality indices: A review of methods to interpret air quality status // *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 34. P. 863–868. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.141>
22. Zhu J., Jiang D., Shen Y., Shen Y. Does regional air quality affect executive turnover at listed companies in China? // *Economic Modelling*. 2021. Vol. 97. P. 428–436. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2020.04.011>
23. Сталинская Е.В., Охтенъ А.А. Концептуальные основы стратегического управления устойчивым развитием металлургического предприятия // *Экономика промышленности*. 2012. № 1–2 (57–58). С. 353–360.
24. Амосова Ю.Е., Матвеева М.А. Экологически чистое производство как элемент устойчивого развития металлургических предприятий // *Вестник Южно-уральского государственного университета. Серия: Металлургия*. 2019. Т. 19. № 1. С. 43–49.
15. Lin B., Zhu J. Policy effect of the Clean Air Action on green development in Chinese cities. *Journal of Environmental Management*. 2020, vol. 258, article 110036. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110036>
16. Bush J. The role of local government greening policies in the transition towards nature-based cities. *Environmental Innovation and Societal Transitions*. 2020, vol. 35, pp. 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2020.01.015>
17. Kulińska E., Dendera – Gruszka M. Green cities – problems and solutions in Turkey. *Transportation Research Procedia*. 2019, vol. 39, pp. 242–251. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.026>
18. Klyuev N.N. Air quality of Russian cities for 1991 – 2016. *Regional Research of Russia*. 2019, vol. 9, no. 2, pp. 204–212. <https://doi.org/10.1134/S2079970519020072>
19. Stepanova A.V. Improving public administration in atmospheric air protection. *Vestnik UGNTU. Nauka, obrazovanie, ekonomika. Seriya: ekonomika*. 2019, no. 2 (28), pp. 67–74. (In Russ.).
20. Idrees Z., Zheng L. Low cost air pollution monitoring systems: A review of protocols and enabling technologies. *Journal of Industrial Information Integration*. 2019, vol. 17, article 100123. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2019.100123>
21. Suman. Air quality indices: A review of methods to interpret air quality status. *Materials Today: Proceedings*. 2019, vol. 34, pp. 863–868. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.141>
22. Zhu J., Jiang D., Shen Y., Shen Y. Does regional air quality affect executive turnover at listed companies in China? *Economic Modelling*. 2021, vol. 97, pp. 428–436. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2020.04.011>
23. Stalinskaya E.V., Okhten' A.A. Conceptual framework for strategic management of sustainable development of metallurgical enterprise. *Ekonomika promyshlennosti*. 2012, no. 1–2 (57–58), pp. 353–360. (In Russ.).
24. Amosova Yu.E., Matveeva M.A. Environment friendly production as an element of sustainable development of metallurgical enterprises. *Vestnik Yuzhno-ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*. 2019, vol. 19, no. 1, pp. 43–49. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ольга Владимировна Глушакова, д.э.н., профессор кафедры экономики, учета и финансовых рынков, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-5410-6623
E-mail: trinity@ktk.company

Оксана Петровна Черникова, к.э.н., доцент, заведующий кафедрой экономики, учета и финансовых рынков, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-9268-415x
E-mail: chernikovaop@yandex.ru

Ol'ga V. Glushakova, Dr. Sci. (Economics), Prof. of the Chair of Economics, Accounting and Financial Markets, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-5410-6623
E-mail: trinity@ktk.company

Oksana P. Chernikova, Cand. Sci. (Economics), Assist. Prof., Head of the Chair of Economics, Accounting and Financial Markets, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-9268-415x
E-mail: chernikovaop@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.10.2020
 После доработки 14.12.2020
 Принята к публикации 15.12.2020

Received 12.10.2020
 Revised 14.12.2020
 Accepted 15.12.2020



Оригинальная статья

УДК 519.677

DOI 10.17073/0368-0797-2021-4-302-310



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА УНРС ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ ПРИ ЕГО ПОДАЧЕ ИЗ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ПОГРУЖНОГО СТАКАНА

В. И. Одинокое¹, А. И. Евстигнеев^{1,2}, Э. А. Дмитриев¹,
С. Ю. Александров¹, Г. И. Усанов¹

¹ Комсомольский-на-Амуре государственный университет (Россия, 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27)

² Хабаровский федеральный исследовательский центр (Институт машиноведения и металлургии) ДВО РАН (Россия, 681005, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1)

Аннотация. Экспериментальные исследования течения жидкого металла в кристаллизаторе УНРС являются продолжительным, сложным и трудоемким процессом. Поэтому все шире используется для этого математическое моделирование численными методами. Предложена новая технология разлива жидкого металла в кристаллизатор. Приведена оригинальная запатентованная конструкция устройства, состоящая из прямооточного и вращающегося глухонного стаканов. Представлены основные результаты исследований течения расплава в объеме кристаллизатора. Объектами исследований стали гидродинамические и тепловые потоки жидкого металла нового процесса разлива стали в кристаллизатор прямоугольного сечения УНРС, а результатом – пространственная математическая модель, описывающая потоки и температуры жидкого металла в кристаллизаторе. Для моделирования процессов, протекающих при течении металла в кристаллизаторе, использован специально созданный программный комплекс. В основу теоретических расчетов положены основополагающие уравнения гидродинамики, уравнения математической физики (уравнение теплопроводности с учетом массопереноса) и апробированный численный метод. Исследуемую область разбивали на элементы конечных размеров, для каждого элемента записывали в разностном виде полученную систему уравнений. Результат решения – поля скоростей и температур потока металла в объеме кристаллизатора. По разработанным численным схемам и алгоритмам составлена программа расчета. Приведен пример расчета разлива стали в кристаллизатор прямоугольного сечения, схемы потоков жидкого металла по различным сечениям кристаллизатора. Наглядно представлены векторные потоки жидкого металла в различных сечениях кристаллизатора при разных углах поворота глухонного стакана. Выявлены области интенсивной турбулентности. Представлено сравнение потоков металла описанного технологического процесса заливки с традиционной подачей металла через неподвижный глухонный стакан.

Ключевые слова: численное моделирование, гидродинамика, теплообмен, жидкий металл, разливка, кристаллизатор, установка непрерывной разлива стали, вращающийся погружной стакан

Для цитирования: Одинокое В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А., Александров С.Ю., Усанов Г.И. Математическое моделирование процесса заполнения кристаллизатора УНРС жидким металлом при его подаче из вращающегося погружного стакана // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 4. С. 302–310. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-302-310>

Original article

MATHEMATICAL MODELING OF FILLING THE CCM MOLD WITH LIQUID METAL DURING ITS SUPPLY FROM A ROTATING SUBMERSIBLE NOZZLE

V. I. Odinokov¹, A. I. Evstigneev^{1,2}, E. A. Dmitriev¹,
S. Yu. Aleksandrov¹, G. I. Usanov¹

¹ Komsomolsk-on-Amur State University (27 Lenina Ave., Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk Territory 681013, Russian Federation)

² Khabarovsk Federal Research Center (Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences) (1 Metallurgov Str., Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk Territory 681005, Russian Federation)

Abstract. Experimental studies of the flow of liquid metal in CCM mold are long, complex and labor consuming process. Therefore, mathematical modeling by numerical methods is increasingly used for this purpose. The article considers a new technology for liquid metal supply into a mold. The authors present original patented design of the device, consisting of direct-flow and rotating bottom nozzles. The main results of investigations of the melt flow in the mold are considered. The objects of research were hydrodynamic and heat flows of liquid metal at new process of steel casting

into a CCM mold of rectangular section. The result is spatial mathematical model describing flows and temperatures of liquid metal in the mold. To simulate the processes occurring during metal flow in the mold, special software was designed. Theoretical calculations are based on fundamental equations of hydrodynamics, equations of mathematical physics (equation of heat conduction taking into account mass transfer) and proven numerical method. The area under study was divided into elements of finite dimensions; for each element, resulting system of equations was written in difference form. The results are fields of velocities and temperatures of metal flow in the mold volume. A calculation program was compiled based on developed numerical schemes and algorithms. An example of calculation of steel casting into a mold of rectangular cross-section, and flow diagrams of liquid metal along various sections of the mold are given. Vector flows of liquid metal in different sections of the mold are clearly presented at different angles of rotation of the deep-bottom nozzle. The authors have identified the areas of intense turbulence. Metal flows of the described technological process were compared with traditional metal supply through a fixed bottom nozzle.

Keywords: numerical modeling, hydrodynamics, heat and mass transfer, liquid metal, casting, mold, CCM, rotating submersible nozzle

For citation: Odnokov V.I., Evstigneev A.I., Dmitriev E.A., Aleksandrov S.Yu., Usanov G.I. Mathematical modeling of filling the CCM mold with liquid metal during its supply from a rotating submersible nozzle. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 302–310. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-302-310>

ВВЕДЕНИЕ

Получение непрерывнолитого слитка с качественной структурой начинается при заливке жидкого металла в кристаллизатор установки непрерывной разливки стали (УНРС). Именно в кристаллизаторе УНРС начинает формироваться твердая фаза металла и его зернистая структура. Известно, что чем интенсивнее и равномернее потоки металла в объеме кристаллизатора, тем мельче получаемое при кристаллизации зерно металла и эффективнее процесс теплоотвода через стенки кристаллизатора. В многочисленных работах описываются различные способы и устройства подачи жидкого металла в кристаллизатор УНРС [1 – 3], использование магнитного перемешивания [4], подача металла из нескольких погружных стаканов [5], подача металла в кристаллизатор из погружного стакана с эксцентричными отверстиями для выхода металла [6], выход металла с помощью отражателя [7]. Другие новаторские решения и практические результаты по подаче жидкого металла в кристаллизатор УНРС и его перемешивание представлены в работах [8 – 22].

При этом для ряда способов подачи жидкого металла в кристаллизатор уже построены математические модели, позволяющие по движущемуся жидкому металлу в объеме кристаллизатора оценить эффективность того или иного устройства, с помощью которого осуществляется этот процесс [23].

Предложен новый процесс заполнения жидким металлом и его перемешивание в кристаллизаторе УНРС [24]. В работе [25] математически описан этот новый процесс и представлены некоторые результаты моделирования только по двум сечениям кристаллизатора.

В настоящей работе представлены результаты исследования кинематики потоков жидкого металла по всем другим сечениям кристаллизатора.

Постановочные инженерные и математические части задачи в основном изложены в работе [25], в которой в графическом виде представлена схема процесса разлива жидкого металла в кристаллизатор при свободном вращении погружного стакана. Обоснована схема вращения квадратного погружного стакана для вычисления потоков металла в двух положениях. Идеализация про-

цесса [25] позволяет рассматривать процесс как стационарный, что значительно облегчает его постановку и решение. Кроме того, не учитывается появляющаяся на гранях кристаллизатора корочка затвердевшего металла.

Суть нового способа состоит в следующем. Жидкий металл из ковша через погружной прямооточный стакан поступает в плавающий глухонный стакан квадратного поперечного сечения, откуда через эксцентричные окна выходит в кристаллизатор. Выходящие из эксцентричных окон струи жидкого металла создают вращательный момент, приводящий в движение (вращение) плавающий глухонный стакан.

Вследствие вращения глухонного стакана струи жидкого металла будут создавать эффект перемешивания, которое дополнительно усиливается от вращения квадратных граней. Квазистационарный процесс повторяется при повороте квадратного стакана на 180° при кристаллизаторе прямоугольного сечения и на 90° при кристаллизаторе квадратного поперечного сечения. Рассмотрим процесс подачи металла в кристаллизатор прямоугольного поперечного сечения.

При математической постановке задачи рассматривали стационарный процесс истечения жидкого металла из окон квадратного стакана в кристаллизатор прямоугольного поперечного сечения. Среда (жидкий металл) считается несжимаемой.

Для несжимаемой жидкости ($\rho = \text{const}$) и стационарного течения $\left(\frac{\partial v_i}{\partial t} = 0\right)$ имеем следующую систему уравнений гидродинамики:

– закон количества движения

$$F_i^* - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 v_i = I_i, \quad F_2^* = F_3^* = 0;$$

$$I_i = \rho \frac{dv_i}{d\tau}, \quad \frac{dv_i}{d\tau} = v_k \frac{dv_i}{dx_k}, \quad i, k = 1, 2, 3; \quad (1)$$

$$\nabla^2 v_i = \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_3^2}, \quad i = 1, 2, 3;$$

– уравнение несжимаемости

$$v_{i,j} = 0; \quad (2)$$

$$v_{i,i} = 0, i = 1, 2, 3; \quad (6)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; ξ_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций; δ_{ij} – символ Кронекера.

Для стационарного процесса:

$$\dot{v}_i = \frac{\partial v_i}{\partial \tau} = 0.$$

$$\sigma_{11}|_{\Gamma_2} = p_1; \quad (\sigma_{12} = \sigma_{13})|_{\Gamma_2} = 0; \quad i = 1 \div 3;$$

$$(\sigma_{21} = \sigma_{23})|_{\Gamma_i} = 0; \quad i = 4, 6, 7;$$

$$\sigma_{31} = \sigma_{32}|_{\Gamma_i} = 0; \quad i = 5, 8;$$

$$v_3|_{\Gamma_6} = V_3^*; \quad v_2|_{\Gamma_5} = V_2^*;$$

$$v_1|_{\Gamma_1} = v_u; \quad v_1|_{\Gamma_2} = 0; \quad v_2|_{\Gamma_7} = 0;$$

$$v_2|_{\Gamma_4} = v_2^*; \quad v_3|_{\Gamma_8} = 0. \quad (7)$$

При решении уравнения (3) использовали следующие граничные условия:

$$\sigma_{ij,j} + F_i^* = I_i^*, \quad I_i^* = \rho \left(\dot{v}_i + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right); \quad (4)$$

$$\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2\mu \xi_{ij}, \quad \xi_{ij} = \frac{1}{\gamma} (v_{i,j} + v_{j,i}); \quad (5)$$

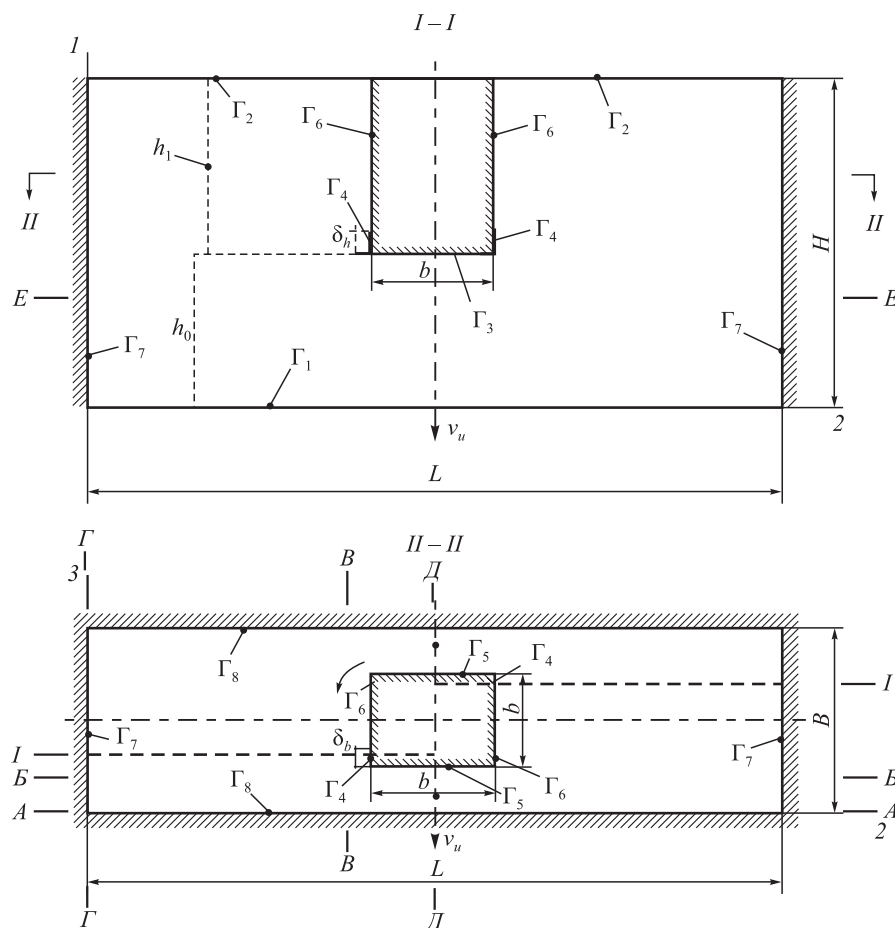


Fig. 1. Formalized design scheme of the task of metal casting in a mold

$$\begin{aligned}
 \theta|_{\Gamma_2} &= \theta_2^*; \theta|_{\Gamma_1} = \theta_1^*; \theta|_{\Gamma_3} = \theta_3^*; \\
 \theta|_{\Gamma_4} &= \theta_4^*; \theta|_{\Gamma_5} = \theta_5^*; \theta|_{\Gamma_6} = \theta_6^*; \\
 q|_{\Gamma_8} &= q_1^*; q_2|_{\Gamma_7} = q_2^*;
 \end{aligned} \quad (8)$$

здесь v_u – скорость вытягивания слитка (рис. 1); v_2^* – скорость выхода жидкого металла из окон погружного стакана; V_i^* – скорость вращения поверхностей граней ($i = 5, 6$); θ_i^* – заданные функции распределения температуры металла на поверхностях Γ_i ; q_i^* ($i = 1, 2$) – заданные по экспериментальным данным тепловые потоки через поверхности Γ_8, Γ_7 .

Решение системы уравнений (4) – (6) при граничных условиях (7) осуществляли численным методом в соответствии с численной схемой и алгоритмом [23, 26]. Решение уравнения теплопроводности для нестационарного процесса нагрева описано в работе [26].

Используя численную методику [26], рассмотрим уравнение теплопроводности для стационарного процесса с учетом массопереноса (3), и запишем его разностный аналог для элемента, находящегося внутри рассматриваемой области. Следуя методике [26], уравнение теплопроводности (3) по элементу (рис. 2) для стационарного случая с учетом массопереноса без внутренних источников тепла будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^3 t_{i2}(\theta_i^+ - \theta_k^-) - \sum_{i=1}^3 t_{i1}(\theta_k^+ - \theta_i^-) = \\
 = \sum_{i=1}^3 t_i(\theta_k - \theta_i^-) - \sum_{i=1}^3 a_i(\theta_i^+ - \theta_k^-);
 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned}
 t_{12} &= \frac{4F_1^2 A}{S_{21}^+ + S_{21}^-}; \quad t_{11} = \frac{4F_1^1 A}{S_{21}^+ + S_{21}^-}; \\
 t_1 &= \frac{2v_1^*}{S_{21}^+ + S_{21}^-}; \quad a_1 = \frac{2v_1^*}{S_{21}^+ + S_{21}^-}; \\
 t_{22} &= \frac{4F_2^2 A}{S_{12}^+ + S_{12}^-}; \quad t_{21} = \frac{4F_2^1 A}{S_{12}^+ + S_{12}^-}; \\
 t_2 &= \frac{2v_2^*}{S_{12}^+ + S_{12}^-}; \quad a_2 = \frac{2v_2^*}{S_{12}^+ + S_{12}^-}; \\
 t_{32} &= \frac{4F_3^2 A}{S_{23}^+ + S_{23}^-}; \quad t_{31} = \frac{4F_3^1 A}{S_{23}^+ + S_{23}^-}; \\
 t_3 &= \frac{2v_3^*}{S_{23}^+ + S_{23}^-}; \quad a_3 = \frac{2v_3^*}{S_{23}^+ + S_{23}^-};
 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$A = \frac{\lambda}{c\gamma V_k}; \quad F_i^j = S_{ik}^j S_{ip}^j; \quad i \neq k \neq p;$$

$$i, k, p = 1, 2, 3;$$

$$V_k = \frac{S_{12} S_{13} S_{21}}{16},$$

где θ_k – среднее значение температуры в k -ом элементе; θ_i^+ и θ_i^- – среднее значение температуры в элементе

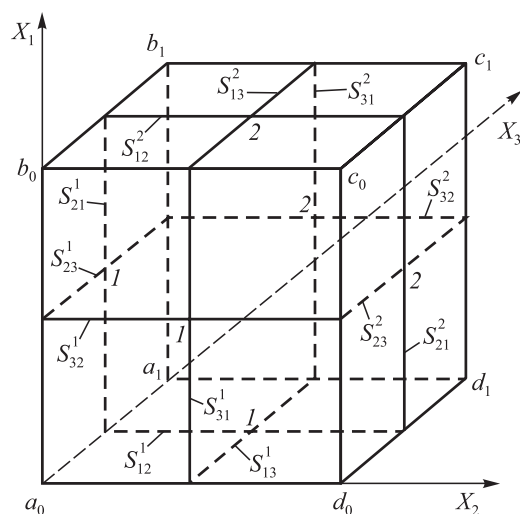


Рис. 2. Вид элемента области разбиения

Fig. 2. View of the separation area element

те, следующим за элементом k в отрицательную и положительную стороны по координате x_i ; $S_{ij}^- = S_{ij}^{1-} + S_{ij}^{2-}$ и $S_{ij}^+ = S_{ij}^{1+} + S_{ij}^{2+}$ – значения дуг S_{ij} элементов, граничащих с элементом k с соответствующей стороны; v_i^* – средние по элементу проекции скорости перемещений по координатным осям x_i ($i = 1, 2, 3$).

При заданных значениях v_i^* ($i = 1, 2, 3$) уравнения (9) линейные. Решая их с учетом граничных условий (8), получим значения θ_k , $k = 1, \dots, m$, где m – количество элементов.

Алгоритм решения:

- исследуемая область течения разбивается на элементы ортогональной формы, рассчитывается матрица длин дуг элементов;
- по разработанной специальной программе [27] численно решается система нелинейных уравнений (4) – (6) с учетом граничных условий (8);
- численно решается система уравнений теплопроводности (9) с учетом граничных условий (10) и найденных значений v_i ($i = 1, 2, 3$).

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для сравнения кинематики течения металла в кристаллизаторе задавали исходные параметры [23]. Геометрические размеры кристаллизатора следующие: $H = 100$ см; $B = 25$ см; $l = 200$ см; $h_1 = 20$ см; $b = 15$ см; $\delta_h = 8,5$ см; $\delta_B = 3$ см. Принимали $v_u = 1$ м/мин = 1,66 см/с, тогда для стационарного процесса определяли величину v_2^* из равенства секундных объемов:

$$v_u B l = 2v_2^* \delta_n \delta_B; \quad \Rightarrow \quad v_2^* = \frac{v_u B l}{2\delta_n \delta_B}.$$

Для определения тепловых потоков q_1^* и q_2^* , МВт/м², по стенкам кристаллизатора воспользуемся формулой [28]:

$$q_i^* = 2,5v^{0,8}, \quad i = 1, 2.$$

где v – скорость омывания стенки кристаллизатора, м/с.

При условии, что $q_i^* = -\lambda \left(\frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_i$, получаем

$$(\theta_n^{\beta})_i = (\theta_n^k)_i - \frac{\delta}{\lambda} q_i^*, \quad i = 1, 2,$$

где θ_n^{β} – температура элемента, примыкающего к поверхности n ; θ_n^k – температура внутреннего элемента, находящегося по нормали сразу же за поверхностным элементом β ; δ – расстояние от центра тяжести элемента β до центра тяжести элемента k .

Температуру истекания жидкой стали из окна Γ_4 принимали $\theta^*|_{\Gamma_4} = 1600$ °С. Температуры на поверхностях стакана (рис. 1) S_i ($i = 5, 6$) принимали $\theta^*|_{S_i} = 1550$ °С.

На поверхности Γ_2 (рис. 1) находится жидкая шлаковая «рубашка», температура которой $\theta^*|_{\Gamma_2} = 1550$ °С. Температура кристаллизации $\theta_k = 1450$ °С.

Константы в системе уравнений (10) для стали составляют $\lambda = 0,29$ Вт/(см·с), $c = 444,47$ Дж/(кг·с), $\gamma = 7,8$ г/см³. Коэффициент вязкости стали μ в уравнении (7) принимали $2,1 \cdot 10^{-4}$ кг·с/м² [28]. Число оборотов вращения $n = 10$ об/мин. На рис. 3 – 7 представлены результаты решения.

На рис. 3 изображены потоки металла по широкой грани кристаллизатора в сечении $A-A$ (рис. 1). Рассмотрены два положения вращающегося погружного стакана. Металл выходит из окон стакана вдоль широких граней (рис. 3, а), металл выходит из окон перпендикулярно широкой грани (рис. 3, б).

В первом положении (рис. 3, а) потоки металла похожи на потоки, рассмотренные в работе [23], когда металл выходит в кристаллизатор через эксцентричные окна, но стакан не вращается. В рассматриваемом случае наблюдается (также как и в работе [23]) вихрь, но с очень большой шириной, практически охватывающий всю область кристаллизатора в сечении $A-A$. Это результат вращения граней. Траектория движения металла (рис. 3, б), когда стакан повернут на 90° и поток вращающегося металла из окон направлен прямо в широкие грани. Траектории потоков металла в сечении $A-A$ изменились: потоки внутри кристаллизатора направлены преимущественно в сторону вращения стакана. Изменение траектории движения металла увеличивает интенсивность его перемешивания. Поле температур довольно сложно отобразить в результате такого перемешивания жидкого металла. На рис. 3 крестиками помечены локальные места, в которых температура жидкого металла меньше 1450 °С, то есть возможные центры кристаллизующегося металла. Для наглядности восприятия цифрами на рисунках обозначены модули векторов течения металла.

Траектории течения металла в сечении $B-B$ представлены в работе [25], где рассмотрены два положения погружного стакана. Вихри в этом сечении более сконцентрированы к центру и с левой стороны погружного стакана. При повороте стакана картина потоков в сечении меняется, что также способствует перемешиванию кристаллизующегося металла.

На рис. 4 показаны потоки металла в сечении $B-B$ в двух положениях погружного стакана: струи бьют вдоль широких граней кристаллизатора (рис. 4, а), перпендикулярно широкой грани (рис. 4, б). В первом

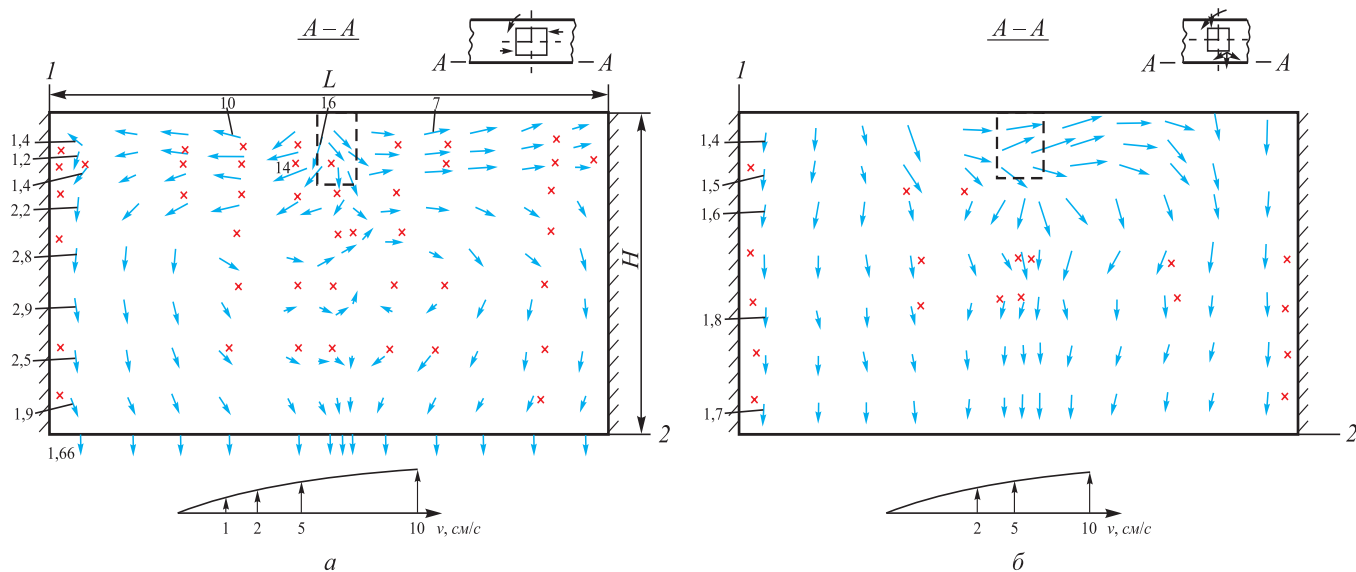


Рис. 3. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в сечении $A-A$ в зависимости от варианта выхода металла из окон стакана (вдоль широких граней (а), перпендикулярно широкой грани (б))

Fig. 3. Velocity field of metal flows in the mold in $A-A$ section, depending on the variant of metal outlet from the nozzle windows (along wide edges (a), perpendicular to wide edges (b))

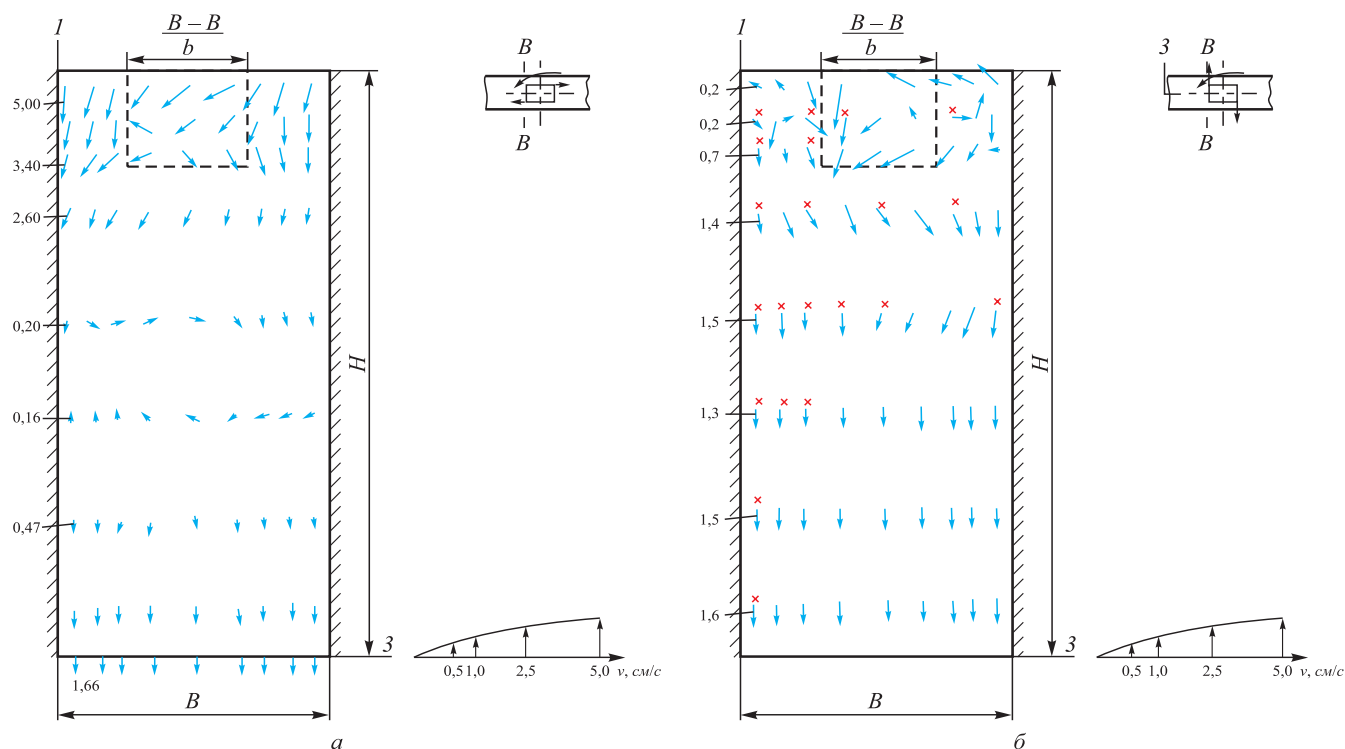


Рис. 4. Поле скоростей потоков течения металла в сечении $B-B$ в зависимости от варианта выхода металла из окон стакана (вдоль широких граней (а), перпендикулярно широким граням (б))

Fig. 4. Velocity field of metal flows in $B-B$ section, depending on the variant of metal outlet from the nozzle windows (along wide edges (a), perpendicular to wide edges (b))

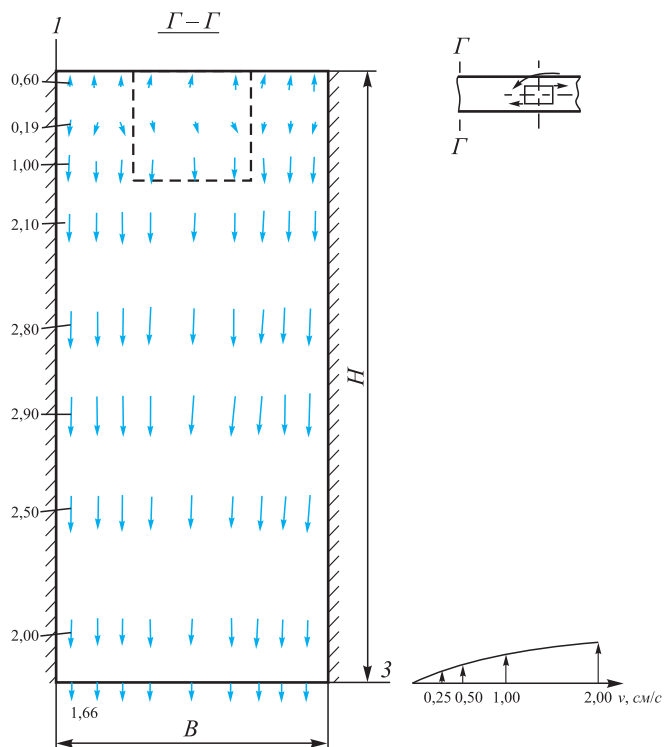


Рис. 5. Поле скоростей потоков течения металла на торце широких граней в сечении $\Gamma-\Gamma$ в зависимости от положения погружного стакана

Fig. 5. Velocity field of metal flows at the end of the wide edges in $\Gamma-\Gamma$ section, depending on the submerged nozzle position

положении (рис. 4, а) интенсивные потоки металла концентрируются в области кристаллизатора, быстро затухая к центру, при повороте (рис. 4, б) – наоборот, ударяясь в широкие грани, поток металла устремляется вниз. Вихрь наблюдается в области погружного стакана. Центры кристаллизации наблюдаются по всему сечению, особенно когда струи выходящего металла направлены вдоль широких стенок кристаллизатора.

На рис. 5 изображены потоки металла на торце широких граней (рис. 1, сечение $\Gamma-\Gamma$) в положении погружного стакана. Вихри отсутствуют. Идет прямолинейное движение металла со скоростью, принимающей максимальное значение в центральной (по высоте) грани кристаллизатора.

На рис. 6 показаны потоки металла в сечении $\Delta-\Delta$ (рис. 1) при положении погружного стакана. Наблюдается очень интересный рисунок потоков. Сначала поток устремляется вниз с обоих боков погружного стакана, но быстро замедляется и поднимается вверх с небольшими скоростями, и только в нижней части сечения опять идет вниз. Это значит, что под погружным стаканом идет интенсивное вихревое движение. Это подтверждает график потоков (рис. 7, а) в горизонтальном сечении $E-E$ (рис. 1), когда погружной стакан находится в том же положении. Видно, что под погружным стаканом идет интенсивное движение, о чем свидетельствуют проекции векторов потоков в горизон-

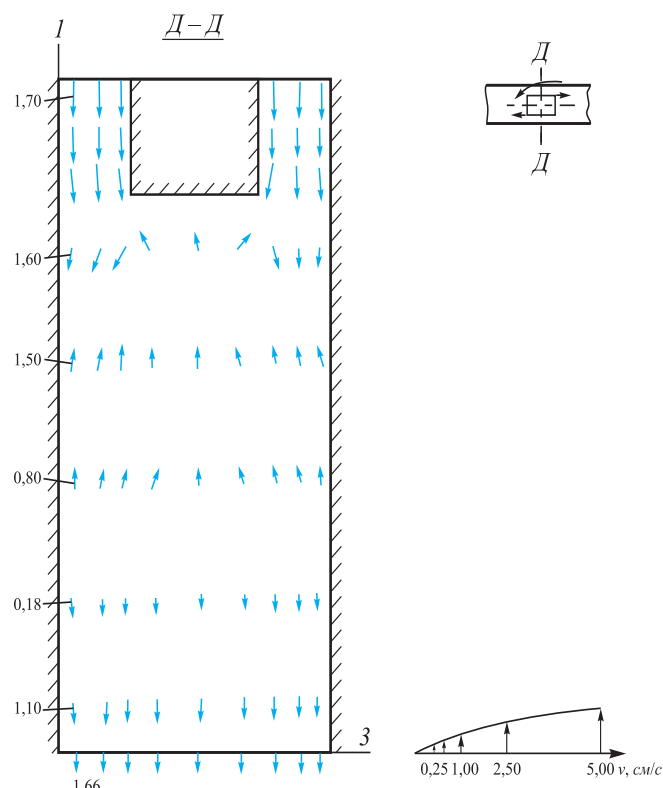


Рис. 6. Поле скоростей потоков течения металла в сечении $D-D$ в зависимости от исходного положения погружного стакана

Fig. 6. Velocity field of metal flows in $D-D$ section depending on the submerged nozzle initial position

тальной плоскости. Кроме того, в сечении $E-E$ видны большие области разнонаправленности векторов течения металла на краях относительно средней части, что свидетельствует о наличии вихревого движения. Центры кристаллизации металла охватывают всю область сечения, особенно по стенкам кристаллизатора и под погружным стаканом. На рис. 7, б показаны потоки, когда погружной стакан повернут на 90° . Видно резкое затухание потоков, которые локализуются в основном в центральной части сечения – под погружным стаканом, впрочем, как и центры кристаллизации.

Выводы

Поставлена и численно решена пространственная задача по определению кинематики течения металла в кристаллизаторе УНРС при его заполнении из погружного вращающегося стакана с эксцентрично расположенными выходными окнами. Представлен подробный анализ течения металла в объеме кристаллизатора по различным его сечениям. Показано, что при таком технологическом процессе перемешивание жидкого

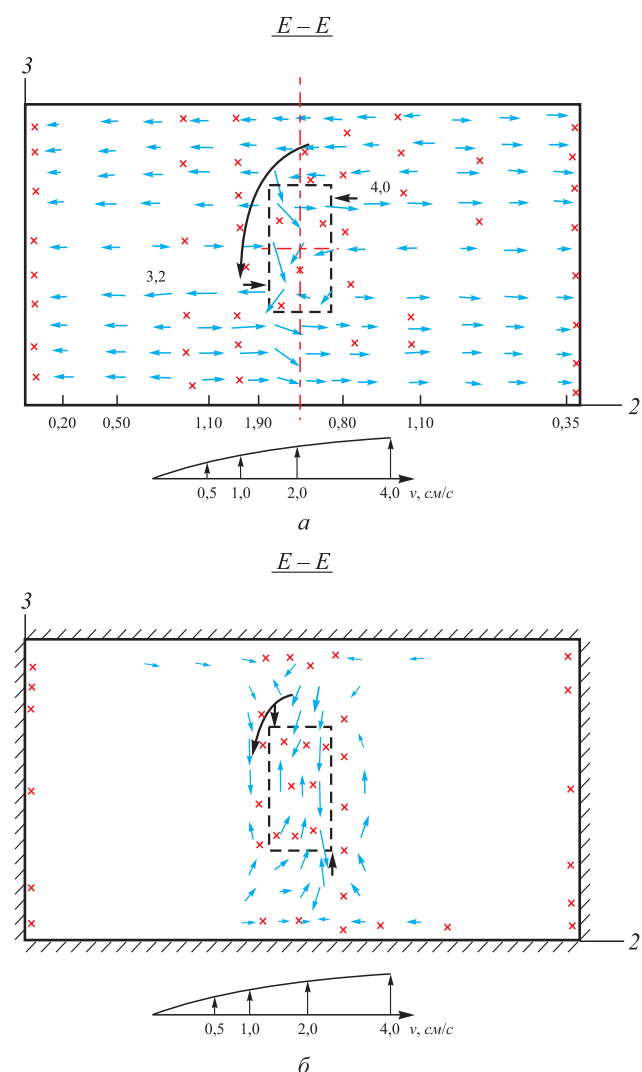


Рис. 7. Поле скоростей потоков металла в горизонтальном сечении $E-E$ в зависимости от положения погружного стакана (в исходном состоянии (а), при повороте погружного стакана на 90° (б))

Fig. 7. Velocity field of metal flows in $E-E$ horizontal section, depending on the submerged nozzle position (in its initial state (a), when turning the submerged nozzle by 90° (б))

металла в кристаллизаторе происходит во много раз более интенсивно, чем при сравниваемом процессе выхода металла в кристаллизатор из погружного стакана, но без вращения. Возникают и изменяются по направлению и скорости многочисленные вихревые потоки, что свидетельствует об интенсивном перемешивании жидкого металла. Перемешивание охватывает весь объем металла в кристаллизаторе. Дополнительное принудительное перемешивание металла позволит еще более значительно повысить однородность металла по всему объему кристаллизатора, а значит качество и свойства формируемых заготовок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В., Смирнов А.И. Производство стали. Т. 4. Непрерывная разливка металла. М.: Теплотехник, 2008. 528 с.
2. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. М.: Metallurgiya, 1976. 552 с.
3. Int. Symp. on Electromagnetic Processing of Materials. October 25–28, 1994. Nagoya, Japan: ISIJ, 1994. 580 p.
4. Шахов С.И., Смоляков А.С., Рогачиков Ю.М. Работа по применению электромагнитного перемешивания при непрерывной разливке стали // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2015. № 10. С. 79–84.
5. Pat. JPS61180656A. Immersion nozzle for continuous casting / Shuzo Fukuda, Toshio Ishii, Toru Kitagawa, Yutaka Okubo, Mikio Suzuki, Toshio Tejima. 13.08.1986.
6. Разработка нового способа разливки слябовых заготовок на МНЛЗ / В.В. Стулов, В.А. Матысик, Т.В. Новиков, С.В. Щербakov, И.В. Чистяков, А.П. Плотников. Владивосток: Дальнаука, 2008. 156 с.
7. Герман Э. Непрерывное литье. М.: Госнаучтехиздат, 1961. 815 с.
8. Ho K., Pehlke R. Modelling of steel solidification using the general finite difference method. In book: Proc. 6th Process Technologic Conf. and 5th Int. Iron and Steel Congr., April 6–9, 1986, Warrendale. Vol. 6. Warrendale. 1986. P. 853–866.
9. Kohn A., Morillon Y. Étude mathématique de la solidification de lingots de 12 tonnes en acier doux et en acier mi-dur // Revue de Metallurgie. 1965. Vol. 62. No. 4. P. 321–338. <https://doi.org/10.1051/metal/196562040321>
10. Mizikar E. Mathematical heat transfer model for solidification of continuous cast steel slabs // Transactions of the Metallurgical Society of AIME. 1967. Vol. 239. No. 11. P. 1747–1753.
11. Szekely J., Stanek V. On heat transfer and liquid mixing in the continuous casting of steel // Metallurgical Transactions. 1970. Vol. 1. No. 1. P. 119–126. <https://doi.org/10.1007/BF02819250>
12. Larreq M., Sagues C., Wanin M. Modèle mathématique de la solidification en coulée continue tenant compte de la convection à l'interface solide-liquide // Revue de Metallurgie. 1978. Vol. 75. No. 6. P. 337–352. <https://doi.org/10.1051/metal/197875060337>
13. Yuan Q., Shi T., Vanka S.P., Thomas B.G. Simulation of turbulent flow and particle transport in the continuous casting of steel. In book: Computational Modeling of Materials Minerals and Metals. Warrendale, PA. 2002. P. 491–500.
14. Thomas B.G., Zhang L. Mathematical modeling of fluid flow in continuous casting // ISIJ International. 2001. Vol. 41. No. 10. P. 1181–1193. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.1181>
15. Thomas B.G., Mika L.J., Najjar F.M. Simulation of fluid flow inside a continuous slab casting machine // Metallurgical Transactions B. 1990. Vol. 21. No. 2. P. 387–400. <https://doi.org/10.1007/BF02664206>
16. Нарцт Х.-П., Кёллерер С., Штахельбергер К. и др. Новаторские решения и практические результаты технологии непрерывного литья слябов // Черные металлы. 2003. № 11. С. 34–38.
17. Виммер Ф., Тёне Х., Пёкштайнер Л. и др. Высокоскоростное литье мелкосотовых заготовок на МНЛЗ с кристаллизатором «Дайэмоуд» // Сталь. 1999. № 6. С. 22–26.
18. Davidson P.A., Boysan F. The importance of secondary flow in the rotary electromagnetic stirring of steel during continuous casting // Applied Scientific Research. 1987. No. 1-2. P. 241–259. <https://doi.org/10.1007/BF00412016>
19. Олер К., Оденталь Х.-Ю., Пфаифер Г., Леманович И. Цифровое моделирование процессов течения и затвердевания металла в МНЛЗ для литья тонких слябов // Черные металлы. 2002. № 8. С. 22–30.
20. Айхингер А., Фраунхубер К., Хёдль Х., Мёрвальд К. Новейшее оборудование для высокопроизводительной непрерывной разливки // Сталь. 2000. № 3. С. 25–28.
1. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V., Smirnov A.I. *Steel Production. Vol. 4. Continuous Casting of Metal*. Moscow: Teplotekhnika, 2008. 528 p. (In Russ.).
2. Efimov V.A. *Casting and Crystallization of Steel*. Moscow: Metallurgiya, 1976. 552 p. (In Russ.).
3. *Int. Symp. on Electromagnetic Processing of Materials. October 25–28, 1994. Nagoya, Japan: ISIJ, 1994. 580 p.*
4. Shakhov S.I., Smolyakov A.S., Rogachikov Yu.M. Application of electromagnetic stirring at steel continuous casting. *Chernaya metallurgiya. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2015, no. 10, pp. 79–84. (In Russ.).
5. Shuzo Fukuda, Toshio Ishii, Toru Kitagawa, Yutaka Okubo, Mikio Suzuki, Toshio Tejima. *Immersion nozzle for continuous casting*. Patent JPS61180656A. Publ. 13.08.1986.
6. Stulov V.V., Matysik V.A., Novikov T.V., Shcherbakov S.V., Chistyakov I.V., Plotnikov A.P. *Development of a New Method for Slab Billets Casting in CCM*. Vladivostok: Dal'nauka, 2008. 156 p. (In Russ.).
7. Herrmann E. *Handbook on Continuous Casting*. Düsseldorf: Aluminium-Verl., 1980. 742 p.
8. Ho K., Pehlke R. Modelling of steel solidification using the general finite difference method. In: *Proc. 6th Process Technologic Conf. and 5th Int. Iron and Steel Congr., April 6–9, 1986, Warrendale*, vol. 6. Warrendale, 1986, pp. 853–866.
9. Kohn A., Morillon Y. Étude mathématique de la solidification de lingots de 12 tonnes en acier doux et en acier mi-dur. *Revue de Metallurgie*. 1965, vol. 62, no. 4, pp. 321–338. (In Fr.). <https://doi.org/10.1051/metal/196562040321>
10. Mizikar E. Mathematical heat transfer model for solidification of continuous cast steel slabs. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1967, vol. 239, no. 11, pp. 1747–1753.
11. Szekely J., Stanek V. On heat transfer and liquid mixing in the continuous casting of steel. *Metallurgical Transactions*. 1970, vol. 1, no. 1, pp. 119–126. <https://doi.org/10.1007/BF02819250>
12. Larreq M., Sagues C., Wanin M. Modèle mathématique de la solidification en coulée continue tenant compte de la convection à l'interface solide-liquide. *Revue de Metallurgie*. 1978, vol. 75, no. 6, pp. 337–352. (In Fr.). <https://doi.org/10.1051/metal/197875060337>
13. Yuan Q., Shi T., Vanka S.P., Thomas B.G. Simulation of turbulent flow and particle transport in the continuous casting of steel. In: *Computational Modeling of Materials Minerals and Metals*. Warrendale, PA, 2002, pp. 491–500.
14. Thomas B.G., Zhang L. Mathematical modeling of fluid flow in continuous casting. *ISIJ International*. 2001, vol. 41, no. 10, pp. 1181–1193. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.1181>
15. Thomas B.G., Mika L.J., Najjar F.M. Simulation of fluid flow inside a continuous slab casting machine. *Metallurgical Transactions B*. 1990, vol. 21, no. 2, pp. 387–400. <https://doi.org/10.1007/BF02664206>
16. Nartst Kh.-P., Kellerer S., Shtakhel'berger K., Merval'd K., Feder-shpil' K., Val' G. Innovative solutions and practical results of continuous slab casting technology. *Chernye metally*. 2003, no. 11, pp. 34–38. (In Russ.).
17. Vimmer F., Tene Kh., Pekshtajner L., Fukskhuber J., Pappich U. High-speed billet casting with the use of “Daimold” technology. *Stal'*. 1999, no. 6, pp. 22–26. (In Russ.).
18. Davidson P.A., Boysan F. The importance of secondary flow in the rotary electromagnetic stirring of steel during continuous casting. *Applied Scientific Research*. 1987, no. 1-2, pp. 241–259. <https://doi.org/10.1007/BF00412016>
19. Oler K., Odental' Kh.-Yu., Pfäifer G., Lemanovich I. Digital modeling of metal flow and solidification processes in CCM for thin slabs casting. *Chernye metally*. 2002, no. 8, pp. 22–30. (In Russ.).
20. Aikhinger A., Frauenhuber K., Khedl' X., Merval'd K. Advanced equipment for high-performance continuous casting. *Stal'*. 2000, no. 3, pp. 25–28. (In Russ.).

21. Eastman C.M. Jr., Glaws P.C. Steel quality improvements with vertical continuous casting at Faircrest steel plant // *ASTM Special Technical Publication*. 2017. Vol. 11. P. 1–22.
<https://doi.org/10.1520/STP160020160157>
22. Drazin P.G., Riley N. *The Navier-Stokes Equations: A Classification of Flows and Exact Solutions* (London Mathematical Society Lecture Note Series. Vol. 334). Cambridge University Press, 2006. 206 p.
23. Одинокое В.И., Дмитриев Э.А., Евстигнеев А.И. Математическое моделирование процесса течения металла в кристаллизаторе при его подаче из погружного стакана с эксцентричными отверстиями // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018. Т. 61. № 8. С. 606–612. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-8-606-612>
24. Патент 2741611 РФ. Устройство для подачи и перемешивания стали в кристаллизаторе установки непрерывной разливки / Одинокое В.И., Дмитриев Э.А., Евстигнеев А.И. Кузнецов С.А., Горнаков А.И., Александров С.Ю. Заявл. 27.02.2020; опубл. 27.01.2021. Бюл. № 3.
25. Одинокое В.И., Дмитриев Э.А., Евстигнеев А.И., Александров С.Ю. Моделирование нового способа подачи и перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе установки непрерывной разливки стали // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021. Т. 64. № 3. С. 237–243.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-237-243>
26. Одинокое В.И., Каплунев Б.Г., Песков А.В., Бахов А.А. Математическое моделирование сложных технологических процессов. М.: Наука, 2008. 176 с.
27. Математическое моделирование гидродинамики расплава в машине непрерывного литья заготовок: Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 201261 / Одинокое В.И., Горнаков А.И. № 201261228. Заявл. 30.03.2012; опубл. 22.05.2012.
28. Kim W.S. Chair T.S. A simplified phenomenological theory of viscosity for liquid metals // *Bulletin of the Korean Chemical Society*. 2001. Vol. 22. No. 1. P. 43–45.
21. Eastman C.M. Jr., Glaws P.C. Steel quality improvements with vertical continuous casting at Faircrest steel plant. *ASTM Special Technical Publication*. 2017, vol. 11, pp. 1–22.
<https://doi.org/10.1520/STP160020160157>
22. Drazin P.G., Riley N. *The Navier-Stokes Equations: A Classification of Flows and Exact Solutions* (London Mathematical Society Lecture Note Series. Vol. 334). Cambridge University Press, 2006, 206 p.
23. Odnokov V.I., Dmitriev E.A., Evstigneev A.I. Mathematical modeling of metal flow in crystallizer at its supply from submersible nozzle with eccentric holes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 8, pp. 606–612. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-8-606-612>
24. Odnokov V.I., Dmitriev E.A., Evstigneev A.I. Kuznetsov S.A., Gornakov A.I., Aleksandrov S.Yu. *Device for supplying and stirring steel in a CCM mold*. Patent RF no. 2741611. *Bulleten' izobretenii*. 2021, no. 3. (In Russ.).
25. Odnokov V.I., Dmitriev E.A., Evstigneev A.I., Aleksandrov S.Yu. Simulation of a new method for supplying and stirring liquid metal in a CCM mold. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 3, pp. 237–243 (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-237-243>
26. Odnokov V.I., Kaplunov B.G., Peskov A.V., Bakhov A.A. *Mathematical Modeling of Complex Technological Processes*. Moscow: Nauka, 2008, 176 p. (In Russ.).
27. Odnokov V.I., Gornakov A.I. *Mathematical modeling of melt hydrodynamics in a CCM*. Certificate of state registration of computer programs no. 201261228. Publ. 22.05.2012. (In Russ.).
28. Kim W.S. Chair T.S. A simplified phenomenological theory of viscosity for liquid metals. *Bulletin of the Korean Chemical Society*. 2001, vol. 22, no. 1, pp. 43–45.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Алексей Иванович Евстигнеев, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Управления научно-исследовательской деятельностью, Комсомольский-на-Амуре государственный университет, главный научный сотрудник, Хабаровский федеральный исследовательский центр (Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН)
E-mail: diss@knastu.ru

Эдуард Анатольевич Дмитриев, д.т.н., доцент, ректор, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
E-mail: rector@knastu.ru

Сергей Юрьевич Александров, старший преподаватель, Комсомольский-на-Амуре государственный университет
E-mail: sandrov@mail.ru

Геннадий Иванович Усанов, д.э.н., профессор кафедры «Менеджмент, маркетинг и государственное управление», Комсомольский-на-Амуре государственный университет
E-mail: USANOV_G@mail.ru

Valerii I. Odnokov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. – Consultant, Chief Researcher of the Department of Research Activities, Komsomolsk-on-Amur State University
E-mail: 79122718858@yandex.ru

Aleksei I. Evstigneev, Dr. Sci. (Eng.), Prof. – Consultant, Chief Researcher of the Department of Research Activities, Komsomolsk-on-Amur State University, Chief Researcher, Khabarovsk Federal Research Center (Institute of Mechanical Engineering and Metallurgy, Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences)
E-mail: diss@knastu.ru

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

Sergei Yu. Alexandrov, Senior Lecturer, Komsomolsk-on-Amur State University
E-mail: sandrov@mail.ru

Gennadii I. Usanov, Dr. Sci. (Economics), Prof. of the Chair “Management, Marketing and Public Administration”, Komsomolsk-on-Amur State University
E-mail: USANOV_G@mail.ru

Поступила в редакцию 24.11.2020
После доработки 10.12.2020
Принята к публикации 11.12.2020

Received 24.11.2020
Revised 10.12.2020
Accepted 11.12.2020



Оригинальная статья

УДК 681.5.015

DOI 10.17073/0368-0797-2021-4-311-316



ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ СТРУКТУР МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ

Л. П. Мышляев^{1,2}, К. Г. Венгер³, В. В. Грачев^{1,2}, К. А. Ивушкин⁴¹ Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)² ООО «Научно-исследовательский центр систем управления» (Россия, 654005, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, пр. Строителей, 55а)³ Администрация Правительства Кузбасса (Россия, 650991, Кемерово, Советский пр., 62)⁴ ООО «Объединенная компания «Сибшахтострой» (Россия, 654034, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, шоссе Кузнецкое, 9)

Аннотация. Исследовательская работа посвящена управлению структурами материалов, которые описаны на основе фрактальных представлений. Формирование фрактальных структур материалов осуществляется за счет положительной обратной связи. Описан первый этап работы: постановки задач идентификации структур материалов на основе фрактальных представлений. Во многих исследованиях последнего времени указывается на фрактальную природу структур материалов, при этом в основе генерации фрактальных структур заложены механизмы положительных обратных связей. Фундаментальные физико-химические закономерности возникновения и трансформации структур материалов на настоящем этапе разработаны и представлены в таком виде, что их затруднительно использовать для синтеза алгоритмов управления структурами. Другими словами, они не отвечают требованиям моделей для управления – не отражают зависимость выходных воздействий от внешних факторов. Представляется полезным пойти по пути создания фрактальных моделей структур (то есть идентификации структур материалов) с последующей выработкой управляющих воздействий, в частности на параметры положительной обратной связи, для прогнозирования и изменения структуры материала в требуемом направлении. Это соответствует методу синтеза алгоритмов управления с оценкой состояний объекта управления и выбору коэффициентов усиления регулятора. Выполнены постановки задач идентификации изображений натуральных структур материалов на основе представлений динамического хаоса. Данные постановки задач использованы для разработки методов и алгоритмов идентификации структур материалов в различных отраслях промышленности, в том числе в горной и металлургической промышленности.

Ключевые слова: структура материала, положительная обратная связь, объекты с положительной обратной связью, идентификация, фрактальные модели

Финансирование: Работа выполнена по Госзаданию Минобрнауки России № 8.8611.2017/8.9.

Для цитирования: Мышляев Л.П., Венгер К.Г., Грачев В.В., Ивушкин К.А. Задачи идентификации структур материалов на основе фрактальных представлений // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 4. С. 311–316. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-311-316>

Original article

PROBLEM OF IDENTIFICATION OF MATERIALS STRUCTURES BASED ON FRACTAL REPRESENTATIONS

L. P. Myshlyayev^{1,2}, K. G. Wenger³, V. V. Grachev^{1,2}, K. A. Ivushkin⁴¹ Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)² LLC “Research Center of Control Systems” (55A Stroitelei Ave., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654005, Russian Federation)³ Administration of the Kuzbass Government (62 Sovetskii Ave., Kemerovo, 650991, Russian Federation)⁴ LLC United Company “Sibshahtostroi” (9 Kuznetskoe Route, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654034, Russian Federation)

Abstract. The research work is devoted to the control of materials structures described on the basis of fractal representations. The formation of fractal structures of materials is carried out due to positive feedback. The article describes the first stage of the work – statements of the problem of identification of materials structures based on fractal representations. Many recent studies indicate the fractal nature of material structures, while the mechanisms of positive feedbacks are based on the generation of fractal structures. At the present stage, the fundamental physicochemical laws governing the emergence and transformation of material structures are developed and presented in such a way that it is difficult to use them for the synthesis of structure control algorithms. In other words, they do not meet the requirements of control models – they do not reflect the dependence of the output actions on external factors. Therefore, it seems useful to go along the path of creating fractal models of structures that are identification structures of materials and then development of control actions, in particular on the parameters of positive feedback for predicting and changing the material structure in the required direction. This corresponds to the method of control algorithms synthesis with an assessment of the control object state and choice of controller gain coefficient. In this work, the statements of the problem of identification images of natural materials structures are formulated. Firstly, fractal models are built using well-known (standard) fractals, and secondly, fractal models are generated using the fractal

structure formation mechanism. In the future, these statements of the problem will be used to develop methods and algorithms for materials structures identification in various industries, including mining and metallurgical industries.

Keywords: material structure, positive feedback, object with positive feedback, identification, fractal model

Funding: The work was performed according to the State Task of the Ministry of Education and Science of Russia no. 8.8611.2017/8.9.

For citation: Myshlyaev L.P., Wenger K.G., Grachev V.V., Ivushkin K.A. Problem of identification of materials structures based on fractal representations. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 311–316. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-311-316>

ВВЕДЕНИЕ

Традиционные методы геометрии, широко используемые в естественных науках при описании структур материалов, в том числе в материаловедении, в горном деле, в нефтегазовой промышленности, в механике деформируемых тел, основаны на приближенной аппроксимации структуры исследуемого объекта геометрическими фигурами, метрическая и топологическая размерности которых равны между собой. При этом внутренняя структура исследуемого объекта игнорируется. Это приводит к утрате значительной части информации о свойствах и поведении исследуемых систем, которые заменяются более или менее адекватными моделями [1 – 3].

Однако известны ситуации, когда использование топологически неэквивалентных моделей принципиально недопустимо. Дробная метрическая размерность таких объектов не только характеризует их геометрический образ, но и отражает процессы их образования и эволюции, определяет динамические свойства [4 – 7].

В настоящее время известно большое количество реальных и модельных механических, физических, химических и биологических систем, в которых проявляется детерминированный хаос [8 – 18]. Хотя в математике уже давно известны объекты геометрии, имеющие дробную размерность, только недавно понятия о фракталах стало основой для рассмотрения различных окружающих нас природных форм, в том числе и для описания структур материалов [19 – 23].

Процессы, порождающие фрактальные структуры материалов, – обычные процессы с положительной обратной связью, в которых одна и та же операция выполняется снова и снова, когда результат одной итерации является начальным значением для следующей (см. рисунок) [5].

Зависимость между результатом и начальным значением, то есть динамический закон $X_{n+1} = f(X_n)$, выражается с помощью следующих формул [10]:

$$X_{n+1} = f(X_n) = X_n^2 + c;$$

$$X_{n+1} = f(X_n) = (1 + r)X_n - rX_n^2,$$

где X_n – переменная величина; $f(X_n)$ – функция преобразования; c – параметр, комплексная постоянная, причём $X_n, c \in \mathbb{C}$; r – коэффициент прироста.

Цель настоящей работы – сформулировать постановку задач идентификации структур материалов на основе фрактальных представлений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках исследования выполнены постановки задач идентификации изображений натуральных структур материалов [24, 25]:

- фрактальными моделями, построенными с помощью известных (типовых) фракталов;
- фрактальными моделями, сгенерированными с помощью механизма формирования фрактальной структуры.

Экспериментальные методы фрактального анализа предполагают аппроксимацию реальных (натуральных) структур материалов фракталами определенного поколения. При описании (идентификации) изображений натуральных структур можно идти двумя путями. Первый путь заключается в подборе настроечных коэффициентов или параметров при известном механизме формирования структуры. Этот способ осложняется тем, что фундаментальные исследования по поиску такого механизма формирования практически отсутствуют. Второй способ заключается в описании натуральных структур с использованием именно фрактальных представлений.

При идентификации материалов вторым способом возможны два варианта:

- описание структуры заранее готовыми фракталами;
- генерирование фрактальной структуры с использованием известных алгоритмов.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФРАКТАЛЬНЫМИ МОДЕЛЯМИ, ПОСТРОЕННЫМИ С ПОМОЩЬЮ ИЗВЕСТНЫХ (ТИПОВЫХ) ФРАКТАЛОВ

При первом варианте идентификации готовыми фракталами в зависимости от конечной цели построения моделей структуры материалов и имеющейся

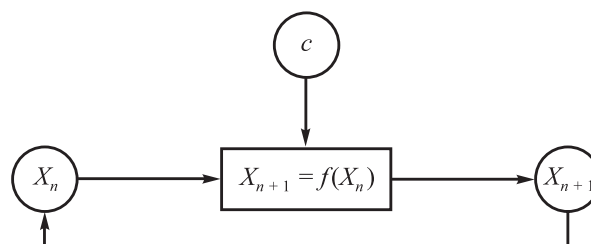


Схема формирования фрактальной структуры

Scheme of fractal structure formation

априорной информации можно сделать три постановки задач.

Постановка задачи I

Дано:

1. Натурные структуры материалов

$$St_j; j = \overline{1, J},$$

где j – номер структуры; J – количество структур.

2. Набор типовых фракталов

$$Fr_l; l = \overline{1, L},$$

где l – номер типового фрактала; L – количество фракталов.

3. Критерий идентификации

$$Q_{j,l} = \sum_{m,n;l=1}^{M,N,L} |St_j(m,n) - Fr_l(m,n)| \rightarrow \min,$$

где m, n – количество точек на изображении структуры.

4. Ограничение

$$M \in \overline{1, M^{\max}}; N \in \overline{1, N^{\max}},$$

где $M^{\max}, N^{\max}$ – максимальное количество точек.

Требуется выбрать из набора Fr_l такой фрактал, для которого Q имеет минимальное значение.

Постановка задачи II

Дано:

1. Натурные структуры материалов

$$St_j; j = \overline{1, J}.$$

2. Набор типовых фракталов

$$Fr_l; l = \overline{1, L}.$$

3. Модель структуры материала

$$St_j^M = \sum_{j,l=1}^{J,L} \alpha_{ij} Fr_l + \varepsilon_j; j = \overline{1, J},$$

где α_{ij} – искомые весовые коэффициенты; ε_j – невязки модели (помеха).

4. Критерии идентификации

$$Q_j = \sum_{j=1}^J |St_j(m,n) - St_j^M(m,n)| \rightarrow \min; \tau_{\text{ре}} \rightarrow \min,$$

где $\tau_{\text{ре}}$ – время спада автокорреляционной функции невязки.

5. Ограничение

$$M \in \overline{1, M^{\max}}; N \in \overline{1, N^{\max}}.$$

Требуется следующее: определить оптимальные весовые коэффициенты α_{ij} ; определить наличие доминирующего типового фрактала.

Постановка задачи III

Дано:

1. Натурные структуры материалов

$$St_j; j = \overline{1, J}.$$

2. Набор типовых фракталов

$$Fr_l; l = \overline{1, L}.$$

3. Модель структуры материала

$$St_j^M \cup \left\{ \frac{Fr_l}{S_{kl}} \right\} + \varepsilon_j,$$

где S_{kl} – притягивающее пространство (площадь) натурной структурой l -типового фрактала; k – номер притягивающего пространства; ε_j – невязка модели.

4. Критерии идентификации

$$Q_j = \sum_{k=1}^K S_{kl} \sum_{m,n=1}^{M,N} \left| \frac{St_j(m,n) - St_j^M(m,n)}{S_{kl}(m,n)} \right| \rightarrow \min,$$

где K – число притягивающих пространств.

5. Ограничение

$$M \in \overline{1, M^{\max}}; N \in \overline{1, N^{\max}}; K \in \overline{1, K^{\max}},$$

где $K^{\max}$ – максимальное число притягивающих пространств.

Требуется следующее: определить размеры пространства S_{kl} для величины Fr_l ; сформировать модель структуры из комбинации Fr_l/S_{kl} .

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФРАКТАЛЬНЫМИ МОДЕЛЯМИ, СГЕНЕРИРОВАННЫМИ С ПОМОЩЬЮ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ ФРАКТАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

При втором варианте решения задачи идентификация изображения натурной структуры материала осуществляется путем формирования фрактальной структуры.

В самом общем виде постановка задачи идентификации структур материалов с использованием механизма генерации фракталов выглядит следующим образом.

Дано:

1. Натурные структуры материала

$$St_j; j = \overline{1, J}.$$

2. Математическая запись процедуры формирования фракталов [6]

$$X_{n+1} = f(X_n) = X_n^2 + c;$$

$$X_{n+1} = f(X_n) = (1+r)X_n - rX_n^2,$$

где r – коэффициент прироста.

3. Алгоритм генерации фракталов

$$Fr_l(r, c); l = \overline{1, L}.$$

4. Критерий идентификации

$$Q_j = \sum_{m, n=1}^{M, N} |St_j(m, n) - Fr_l(m, n, c)| \rightarrow \min.$$

5. Ограничение

$$M \in \overline{1, M^{\max}}; N \in \overline{1, N^{\max}}; L \in \overline{1, L^{\max}},$$

где $L^{\max}$ – максимальное число математических записей.

Требуется определить параметры r, c , минимизирующие величину Q .

Выводы

Приведены четыре постановки задачи идентификации структур материалов на основе фрактальных представлений. Первые три постановки задачи идентификации структур материалов сделаны для случаев использования моделей на базе известных (типовых) фракталов, четвертая постановка задачи – при идентификации структур материалов сгенерированными фрактальными моделями.

В рамках последующих этапов работы на основе данных постановок задач были разработаны методы и алгоритмы идентификации структур материалов на основе фрактальных представлений. Реализация алгоритмов осуществлена на языке высокого уровня C# в среде Microsoft Visual Studio. Были проведены оценки эффективности разработанных методов и алгоритмов идентификации на модельных примерах и на натурных данных. В качестве натурных данных использованы образцы стали марки 35ХГСА, в качестве лабораторной базы – Центр коллективного пользования «Материаловедение» Сибирского государственного индустриального университета.

При проведении идентификации натурных структур образцов стали марки 35ХГСА методами на основе моделей известных (типовых) фракталов и методами с генерацией фрактальных моделей получены примерно одинаковые оценки. При этом использование методов идентификации с генерацией фрактальных моделей является более предпочтительным, так как отсутствует необходимость выбора заранее готовых фрактальных структур, что является также трудно формализуемой задачей.

По результатам натурных исследований сделан вывод об эффективности предложенных постановок задач, методов и алгоритмов идентификации, базирующихся на представлениях динамического хаоса, и о возможности их применения для идентификации натурных структур материалов и горных пород для горно-металлургической промышленности и в материаловедении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Емельянов С.В., Коровин С.К. Новые типы обратной связи: управление при неопределенности. М.: Наука, Физматлит, 1997. 352 с.
2. Robert C., Lee K. Optimal Estimation, Identification, and Control. Cambridge: MIT Press, 1966. 152 p.
3. Методы классической и современной теории автоматического управления. В 3-х томах. Т. 1. Анализ и статистическая динамика систем автоматического управления / Под ред. Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 748 с.
4. Benoit B. Mandelbrot. The Fractal Geometry of Nature. New York: Freeman, 1982. 468 p.
5. Peitgen H.-O., Richter P.H. The Beauty of Fractals. Images of Complex Dynamical Systems. Berlin: Springer-Verlag, 1986. 169 p.
6. Jens F. Fractals. New York: Plenum Press, 1988. 217 p.
7. Benoit B. Mandelbrot. Fractals in Physics. Trieste, ICTP, 1985. 623 p.
8. Васильев Н.И., Даченко Е.Н., Орлова И.О., Авакимян Н.Н., Лешкович Н.М. Фрактальный подход к увеличению нефтеотдачи пласта // Булатовские чтения. 2017. Т. 2. С. 54–56.
9. Хасанов М.М. Фрактальные характеристики динамики объектов управления // Автоматика и телемеханика. 1994. № 2. С. 59–67.
10. Жихарев Л.А. Фракталы в трехмерном пространстве. I-фракталы // Геометрия и графика. 2017. Т. 5. № 3. С. 55–66. https://doi.org/10.12737/article_59bfa55ec01b38.55497926
11. Avnir D. The Fractal Approach to Heterogeneous Chemistry. 1989. 232 p.
1. Emel'yanov S.V., Korovin S.K. New Types of Feedback: Control under Uncertainty. Moscow: Nauka, Fizmatlit, 1997, 352 p. (In Russ.).
2. Robert C., Lee K. Optimal Estimation, Identification, and Control. Cambridge: MIT Press, 1966, 152 p.
3. Methods of Classical and Modern Theory of Automatic Control. In 3 vols. Vol. 1. Analysis and Statistical Dynamics of Automatic Control Systems. Egupov N.D. ed. Moscow: Bauman STU, 2004, 748 p. (In Russ.).
4. Benoit B. Mandelbrot. The Fractal Geometry of Nature. New York: Freeman, 1982, 468 p.
5. Peitgen H.-O., Richter P.H. The Beauty of Fractals. Images of Complex Dynamical Systems. Berlin: Springer-Verlag, 1986, 169 p.
6. Jens F. Fractals. New York: Plenum Press, 1988, 217 p.
7. Benoit B. Mandelbrot. Fractals in Physics. Trieste, ICTP, 1985, 623 p.
8. Vasil'ev N. I., Datsenko E.N., Orlova I.O., Avakimyan N.N., Leshkovich N.M. Fractal approach to enhanced oil recovery. Bulatovskie chteniya. 2017, vol. 2, pp. 54–56. (In Russ.).
9. Khasanov M.M. Fractal characteristics of control objects dynamics. Avtomatika i telemekhanika. 1994, no. 2, pp. 59–67. (In Russ.).
10. Zhikharev L. A. Fractals in three-dimensional space. I-fractals. Geometry & Graphics. 2017, vol. 5, no. 3, pp. 55–66. (In Russ.). https://doi.org/10.12737/article_59bfa55ec01b38.55497926
11. Avnir D. The Fractal Approach to Heterogeneous Chemistry. 1989, 232 p.

12. Avnir D., Farin D., Pfeifer P. A discussion of some aspects of surface fractality and of its determination // *New Journal of Chemistry*. 1992. Vol. 16. No. 4. P. 439–449.
13. Talibuddin S., Runt J.P. Reliability test of popular fractals techniques applied to small 2-dimensional self-affine data sets // *Journal of Applied Physics*. 1994. Vol. 76. No. 9. P. 5070–5078. <https://doi.org/10.1063/1.358490>
14. Мирзаджанзаде А.Х., Хасанов М.М., Бахтизин Р.Н. Процессы нефтегазодобычи – динамическая система // *Ученые записки Азерб. гос. нефтяной академии*. 1992. № 1. С. 24–30.
15. Lewerenz H.J. Fractal photocorrosion of silicon electrodes in concentrated ammonium fluoride // *Electrochemical and Solid-State Letters*. 2007. Vol. 10. No. 8. P. 51–55. <https://doi.org/10.1149/1.2742503>
16. Hu Y.-Q., Zhao Y.-P., Yu T.-X. Fractal pattern formation in anodic bonding of pyrex glass/Al/Si // *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*. 2008. Vol. 9. No. 4. P. 315–322. <https://doi.org/10.1515/IJNSNS.2008.9.4.315>
17. Bao L., Ma J., Long W., He P., Zhang T., Nguyen V. Fractal analysis in particle dissolution: A review // *Reviews in Chemical Engineering*. 2014. Vol. 30. No. 3. P. 261–287. <https://doi.org/10.1515/revce-2013-0032>
18. Cipriani F., Sauvageot J.L. Fredholm modules on P.C.F. self-similar fractals and their conformal geometry // *Communications in Mathematical Physics*. 2009. Vol. 286. No. 2. P. 541–558. <https://doi.org/10.1007/s00220-008-0673-4>
19. Иванова В.Е., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.
20. Kuznetsov P.V., Panin V.E., Schreiber J. Fractal dimension as a characteristic of deformation stages of austenite stainless steel under tensile load // *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2001. Vol. 35. No. 2. P. 171–177. [https://doi.org/10.1016/S0167-8442\(00\)00058-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8442(00)00058-6)
21. Деревянко А.И., Сяо Цзефан. Фрактальная модель коррозии поверхности металлов // *Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ*. 2011. Вып. 3 (74). С. 152–156.
22. Holten T., Jossang T., Meakin P., Feder J. Fractal characterization of two-dimensional aluminum corrosion fronts // *Physical Review E*. 1994. Vol. 50. No. 2. P. 754–759. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.50.754>
23. Mansouri H., Ibrik K., Bensalah N., Abdel-Wahab A. Anodic dissolution of pure aluminum during electrocoagulation process: Influence of supporting electrolyte, initial pH, and current density // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011. Vol. 50. No. 23. P. 13362–13372. <https://doi.org/10.1021/ie201206d>
24. Starovackaya S.N., Myshlyaev L.P., Tsiryapkina I.V. Materials structure description by fractal complex. In: *External Fields Processing and Treatment Technology and Preparation of Metals and Alloys Nanostructure: Book of the International seminar articles, 1-7 October / Gromov V. ed. Siberian State Industrial University: Publishing Center SibSIU*, 2014. 348 p.
25. Грачев В.В., Мышляев Л.П., Циряпкина А.В., Макаров Г.В., Саламатин А.С., Раскин М.В. Разработка систем управления техническими и социально-экономическими объектами с положительной обратной связью (отчет о проведении НИР). Отчет по теме Госзадания Минобрнауки № 8611БЧ за 2019 г. Шифр работы 8.8611.2017/БЧ. № государственной регистрации АААА-А17-117033010034-9. Инв. АААА-Б20-220011790022-6.
12. Avnir D., Farin D., Pfeifer P. A discussion of some aspects of surface fractality and of its determination. *New Journal of Chemistry*. 1992, vol. 16, no. 4, pp. 439–449.
13. Talibuddin S., Runt J.P. Reliability test of popular fractals techniques applied to small 2-dimensional self-affine data sets. *Journal of Applied Physics*. 1994, vol. 76, no. 9, pp. 5070–5078. <https://doi.org/10.1063/1.358490>
14. Mirzadzhanzade A.Kh., Khasanov M.M., Bakhtizin R.N. Oil and gas production processes – A dynamic system. *Uchenye zapiski Azerb. gos. neftyanoi akademii*. 1992, no. 1, pp. 24–30. (In Russ.).
15. Lewerenz H.J. Fractal photocorrosion of silicon electrodes in concentrated ammonium fluoride. *Electrochemical and Solid-State Letters*. 2007, vol. 10, no. 8, pp. 51–55. <https://doi.org/10.1149/1.2742503>
16. Hu Y.-Q., Zhao Y.-P., Yu T.-X. Fractal pattern formation in anodic bonding of pyrex glass/Al/Si. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*. 2008, vol. 9, no. 4, pp. 315–322. <https://doi.org/10.1515/IJNSNS.2008.9.4.315>
17. Bao L., Ma J., Long W., He P., Zhang T., Nguyen V. Fractal analysis in particle dissolution: A review. *Reviews in Chemical Engineering*. 2014, vol. 30, no. 3, pp. 261–287. <https://doi.org/10.1515/revce-2013-0032>
18. Cipriani F., Sauvageot J.L. Fredholm modules on P.C.F. self-similar fractals and their conformal geometry. *Communications in Mathematical Physics*. 2009, vol. 286, no. 2, pp. 541–558. <https://doi.org/10.1007/s00220-008-0673-4>
19. Ivanova V.E., Balankin A.S., Bunin I.Zh., Oksogoev A.A. *Synergetics and Fractals in Materials Science*. Moscow: Nauka, 1994, 383 p. (In Russ.).
20. Kuznetsov P.V., Panin V.E., Schreiber J. Fractal dimension as a characteristic of deformation stages of austenite stainless steel under tensile load. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2001, vol. 35, no. 2, pp. 171–177. [https://doi.org/10.1016/S0167-8442\(00\)00058-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8442(00)00058-6)
21. Derevyanko A.I., Syao Tszefan. Fractal model of metal surface corrosion. *Sistemnye tekhnologii. Regional'nyi mezhvuzovskii sbornik nauchnykh rabot*. 2011, no. 3 (74), pp. 152–156. (In Russ.).
22. Holten T., Jossang T., Meakin P., Feder J. Fractal characterization of two-dimensional aluminum corrosion fronts. *Physical Review E*. 1994, vol. 50, no. 2, pp. 754–759. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.50.754>
23. Mansouri H., Ibrik K., Bensalah N., Abdel-Wahab A. Anodic dissolution of pure aluminum during electrocoagulation process: Influence of supporting electrolyte, initial pH, and current density. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2011, vol. 50, no. 23, pp. 13362–13372. <https://doi.org/10.1021/ie201206d>
24. Starovackaya S.N., Myshlyaev L.P., Tsiryapkina I.V. Materials structure description by fractal complex. In: *External Fields Processing and Treatment Technology and Preparation of Metals and Alloys Nanostructure: Int. Seminar Articles*. Gromov V. ed. Siberian State Industrial University: Publishing Center SibSIU, 2014, 348 p.
25. Grachev V.V., Myshlyaev L.P., Tsiryapkina A.V., Makarov G.V., Salamatina A.S., Raskin M.V. *Development of control systems for technical and socio-economic facilities with positive feedback (Research report)*. Report on the State assignment of the Ministry of Education and Science no. 8611BCh for 2019. Work code 8.8611.2017 / BC, no. of state registration АААА-А17-117033010034-9. Inv. АААА-В20-220011790022-6. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Леонид Павлович Мышляев, д.т.н., профессор-консультант кафедры автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет, директор, ООО «Научно-исследовательский центр систем управления»

ORCID: 0000-0002-0833-4772

E-mail: mail@nicsu.ru

Константин Геннадьевич Венгер, к.т.н., заместитель губернатора Кузбасса по экономическому развитию, Администрация Правительства Кузбасса

ORCID: 0000-0001-8980-3763

Виталий Викторович Грачев, к.т.н., доцент кафедры автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет, ООО «Научно-исследовательский центр систем управления»

ORCID: 0000-0002-0615-3820

E-mail: vitaly.grachev@nicsu.ru

Константин Анатольевич Ивушкин, к.э.н., генеральный директор, ООО «Объединенная компания «Сибшхтрострой»

ORCID: 0000-0003-2904-3007

E-mail: ivushkin@oksshs.ru

Leonid P. Myshlyayev, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair "Automation and Information Systems", Siberian State Industrial University, Director, LLC "Research Center of Control Systems"

ORCID: 0000-0002-0833-4772

E-mail: mail@nicsu.ru

Konstantin G. Venger, Cand. Sci. (Eng.), Vice Governor of Kuzbass for Economic Development, Administration of the Government of Kuzbass

ORCID: 0000-0001-8980-3763

Vitalii V. Grachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Automation and Information Systems", Siberian State Industrial University, LLC "Research Center of Control Systems"

ORCID: 0000-0002-0615-3820

E-mail: vitaly.grachev@nicsu.ru

Konstantin A. Ivushkin, Cand. Sci. (Economics), General Director, LLC United Company Sibshakhtrostroy

ORCID: 0000-0003-2904-3007

E-mail: ivushkin@oksshs.ru

Поступила в редакцию 18.03.2020

После доработки 08.09.2020

Принята к публикации 26.10.2020

Received 18.03.2020

Revised 08.09.2020

Accepted 26.10.2020

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

10–11 ноября 2021 г.

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

Тел.: +7 (3843) 46-26-29

E-mail: onti@sibsiu.ru

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

ЦЕЛЬ КОНФЕРЕНЦИИ

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

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

СЕКЦИИ КОНФЕРЕНЦИИ

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

ОРГАНИЗАТОРЫ

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

ПАРТНЕРЫ

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

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

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

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

Над номером работали:

Леонтьев Л.И., *главный редактор*

Протопопов Е.В., *заместитель главного редактора*

Ивани Е.А., *заместитель главного редактора*

Бащенко Л.П., *заместитель ответственного секретаря*

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

Запольская Е.М., *ведущий редактор*

Киселева Н.Н., *ведущий редактор*

Расенец В.В., *верстка, иллюстрации*

Кузнецов А.А., *системный администратор*

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

Подписано в печать 28.04.2021. Формат 60×90 ¹/₈. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 9,25. Заказ. Цена свободная.

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

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

HIGH-ENTROPY ALLOYS: STRUCTURE, MECHANICAL PROPERTIES, DEFORMATION MECHANISMS AND APPLICATION

SURFACE LAYER OF 40KH STEEL AFTER ELECTROMECHANICAL TREATMENT WITH DYNAMIC FORCE IMPACT

PHASE AND STRUCTURAL TRANSFORMATIONS WHEN FORMING A WELDED JOINT FROM RAIL STEEL. REPORT 2.
ISOTHERMAL DIAGRAM OF DECOMPOSITION OF SUPERCOOLED AUSTENITE OF R350LHT RAIL STEEL

HYDROMETALLURGICAL ENRICHMENT OF POLYMETALLIC AND FERROMANGANESE ORE

MECHANO-CHEMICAL TECHNOLOGY OF IRON EXTRACTION FROM ENRICHMENT TAILINGS

INFLUENCE OF FERROUS METALLURGY ENTERPRISES ON ATMOSPHERIC AIR QUALITY AS AN ECOLOGICAL COMPONENT
OF TERRITORIES SUSTAINABLE DEVELOPMENT. REPORT 1

MATHEMATICAL MODELING OF FILLING THE CCM MOLD WITH LIQUID METAL DURING ITS SUPPLY FROM A ROTATING
SUBMERSIBLE NOZZLE

PROBLEM OF IDENTIFICATION OF MATERIALS STRUCTURES BASED ON FRACTAL REPRESENTATIONS