

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 65 Номер 7 2022



◦ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Проявление эффекта Баушингера при знакопеременной деформации

Структура и свойства покрытия высокоэнтропийным сплавом FeCoCrNiAl

◦ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Термическое обогащение никеля из лимонита методом селективного восстановления

Оптимизация режима контактной стыковой сварки железнодорожных рельсов

Оценка эффективности использования бакальских сидеритов в доменной плавке

◦ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Вагнеровский параметр взаимодействия водорода с никелем в жидкой стали



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

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 65, Номер 7, 2022

Научно-технический журнал
Издается с января 1958 г. ежемесячно

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

Volume 65, Number 7, 2022

Scientific and Technical Journal
Published since January 1958. Issued monthly

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

www.fermet.misis.ru

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

Варианты названия:

Известия вузов. Черная металлургия
Izvestiya. Ferrous Metallurgy

Учредители:



Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС» (НИТУ МИСиС)



Сибирский государственный индустриальный университет

Главный редактор:

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

Заместитель главного редактора:

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

Адреса редакций:

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

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

Редакционная коллегия:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



Статьи доступны под лицензией Creative Commons
Attribution 4.0 License.

IZVESTIYA FERROUS METALLURGY

www.fermet.misis.ru

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

Alternative title:

Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya
Izvestiya. Ferrous Metallurgy

Founders:



National University of Science
and Technology "MISIS"



Siberian State Industrial University

Editor-in-Chief:

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

Deputy Editor-in-Chief:

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

Editorial Addresses:

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

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

Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Vladimir V. Kurnosov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assist. Prof., NUST "MISIS", Moscow
Linn Horst, Linn High Therm GmbH, Hirschbach, Germany

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



Articles are available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

СОДЕРЖАНИЕ CONTENTS

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Адигамов Р.Р., Андреев В.А., Рогачев С.О., Федотов Е.С., Хадеев Г.Е., Юсупов В.С. Проявление эффекта Баушингера при знакопеременной деформации 455
- Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Осинцев К.А. Структура и свойства покрытия высокоэнтропийным сплавом FeCoCrNiAl 467

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Бахфи Ф., Манаф А., Астути В., Нурджаман Ф., Прасетио Э., Сумарди С. Термическое обогащение никеля из лимонита методом селективного восстановления 471
- Нефедов А.В., Новиков Е.Г., Чиченева О.Н., Горювая Т.Ю., Фортунатов А.Н. Разработка системы централизованной подачи разделительной смазки на пресс-формы литейных комплексов ЗАО «Рифар» 479
- Козырев Н.Ф., Башенко Л.П., Шевченко Р.А., Михно А.Р. Оптимизация режима контактной стыковой сварки железнодорожных рельсов 486
- Католиков В.Д., Семин А.Е., Комолова О.А., Логачев И.А., Бочериков Р.Е., Лакиза В.А. Исследование влияния технологических параметров на скорость азотирования при получении металлических порошков методом плазменного центробежного распыления 494
- Вусихис А.С., Леонт'ев Л.И., Агафонов С.Н. Оценка эффективности использования бакальских сидеритов в доменной плавке 504

ЭКОЛОГИЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ
ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

- Голик В.И., Габараев О.З., Разоренов Ю.И., Масленников С.А. Исследование процессов выщелачивания металлов из хвостов обогащения руд 511

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Большов Л.А., Корнейчук С.К., Большова Э.Л. Вагнеровский параметр взаимодействия водорода с никелем в жидкой стали 519

MATERIAL SCIENCE

- Adigamov R.R., Andreev V.A., Rogachev S.O., Fedotov E.S., Khadeev G.E., Yusupov V.S. Bauschinger effect during alternating deformation 455
- Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Osintsev K.A. Structure and properties of high-entropy FeCoCrNiAl alloy coating .. 467

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- Bahfie F., Manaf A., Astuti W., Nurjaman F., Prasetyo E., Sumardi S. Thermal upgrading of nickel from limonite by means of selective reduction 471
- Nefedov A.V., Novikov E.G., Chicheneva O.N., Gorovaya T.Yu., Fortunatov A.N. Development of a centralized system for separating lubrication supply on press-forms of JSC “Rifar” casting complexes 479
- Kozyrev N.A., Bashchenko L.P., Shevchenko R.A., Mikhno A.R. Optimizing the mode of contact butt welding of railway rails 486
- Katolikov V.D., Semin A.E., Komolova O.A., Logachev I.A., Bocherikov R.E., Lakiza V.A. Influence of technological parameters on nitriding rate in obtaining metal powders by plasma centrifugal spraying 494
- Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Agafonov S.N. Assessment of efficiency of the use of Bakal siderites in blast furnace smelting 504

ECOLOGY AND RATIONAL USE
OF NATURAL RESOURCES

- Golik V.I., Gabaraev O.Z., Razorenov Yu.I., Maslennikov S.A. Metal leaching from ore dressing tailings 511

PHYSICO-CHEMICAL BASICS
OF METALLURGICAL PROCESSES

- Bol'shov L.A., Korneichuk S.K., Bol'shova E.L. Wagner coefficient of interaction between hydrogen and nickel in liquid steel 519



Обзорная статья

УДК 669.017: 539.389.2

DOI 10.17073/0368-0797-2022-7-455-466

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2338>

ПРОЯВЛЕНИЕ ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Р. Р. Адигамов¹, В. А. Андреев^{2,3}, С. О. Рогачев^{2,4}, Е. С. Федотов¹,
Г. Е. Хадеев¹, В. С. Юсупов^{2,5}

¹ АО «Северсталь Менеджмент» (Россия, 127299, Москва, ул. Клары Цеткин, 2)

² Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (Россия, 119334, Москва, Ленинский пр., 49)

³ ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ» (Россия, 117449, Москва, ул. Карьер, 2А, стр. 1, офис 137)

⁴ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

⁵ МИРЭА – Российский технологический университет (Россия, 119454, Москва, пр. Вернадского, 78)

Аннотация. Эффект Баушингера – явление снижения сопротивления материала малым пластическим деформациям после предварительной пластической деформации противоположного знака, открытое в 1881 г. Данный эффект имеет большое значение и применяется, в частности, при изучении вопросов усталостной прочности материалов при знакопеременных нагрузках. Эффект Баушингера присущ всем металлам и сплавам, хотя наиболее сильно проявляется на сталях. Поэтому он является одним из факторов, влияющих на качество готовых металлических изделий, подвергающихся знакопеременному нагружению при изготовлении. В данном обзоре проведен анализ литературных источников по проблеме эффекта Баушингера при знакопеременной деформации металлов. Кратко рассмотрены различные механизмы, объясняющие проявление данного эффекта. Подробно изучены факторы, оказывающие качественное и количественное влияние на проявление эффекта Баушингера: степень предварительной деформации; состав, структура и свойства материала; условия деформирования; явление динамического деформационного старения; температура. Отдельно исследована проблема эффекта Баушингера при знакопеременной деформации стальных изделий, в частности при производстве нефтегазовых труб большого диаметра. Рассмотрены различные методы и подходы к оценке и количественному измерению эффекта Баушингера, показана зависимость параметра Баушингера от допуска на остаточную деформацию. Сделан вывод о том, что эффект Баушингера играет как положительную, так и отрицательную роль при производстве металлических изделий, в частности нефтегазовых труб. С одной стороны, эффект Баушингера оказывает отрицательный эффект, снижая уровень механических свойств конечного продукта ниже требуемого. С другой стороны, создает определенный запас пластичности деформируемого материала в процессе формовки и укладки труб.

Ключевые слова: эффект Баушингера, знакопеременная деформация, трубный передел, предел текучести, предел упругости, микроструктура, дислокации

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИМЕТ РАН № 075-00715-22-00.

Благодарности: Благодарим Радмира Ершатовича Мухамеджанова за ценные советы при подготовке статьи.

Для цитирования: Адигамов Р.Р., Андреев В.А., Рогачев С.О., Федотов Е.С., Хадеев Г.Е., Юсупов В.С. Проявление эффекта Баушингера при знакопеременной деформации // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 7. С. 455–466.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-455-466>

Review article

BAUSCHINGER EFFECT DURING ALTERNATING DEFORMATION

R. R. Adigamov¹, V. A. Andreev^{2,3}, S. O. Rogachev^{2,4}, E. S. Fedotov¹,
G. E. Khadeev¹, V. S. Yusupov^{2,5}

¹ JSC “Severstal Management” (2 Klary Tsetkin Str., Moscow 127299, Russian Federation)

² Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences (49 Leninskii Ave., Moscow 119334, Russian Federation)

³ Industrial Center MATEK-SMA, Ltd. (2-a, bld. 1-137 Kar'er Str., Moscow 117449, Russian Federation)

⁴ National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

⁵ MIREA – Russian Technological University (78 Vernadskogo Ave., Moscow 119454, Russian Federation)

Abstract. The Bauschinger effect is a phenomenon of a decrease in material resistance to small plastic deformations after preliminary plastic deformation of the opposite direction, discovered in 1881. This effect is of great importance and is used, in particular, in studying the fatigue strength of materials under alternating loads. The Bauschinger effect is inherent in all metals and alloys, although it is most pronounced in steels. Therefore, it is one of the factors affecting the quality of finished metal products subjected to alternating loading during manufacture. This review analyzes the literature data on the problem of the Bauschinger effect in the case of alternating deformation of metals. Various mechanisms explaining the Bauschinger effect are briefly considered. The factors that qualitatively and quantitatively affect the Bauschinger effect are described in detail, namely the degree of preliminary deformation, composition, structure and properties of the material, deformation conditions, the phenomenon of dynamic deformation aging, and temperature. The problem of the Bauschinger effect in the case of alternating deformation of steel products is considered, in particular, in the production of oil and gas pipes of large diameter. Various methods and approaches to the evaluation and quantitative measurement of the Bauschinger effect are described; the dependence of the Bauschinger parameter on the value for residual deformation is shown. It is concluded that the Bauschinger effect plays both a positive and a negative role in the production of metal products, in particular oil and gas pipes. On the one hand, the Bauschinger effect has a negative effect, reducing the level of mechanical properties of the final product below the required one. On the other hand, it creates a certain margin of plasticity of the deformable material in the process of forming and laying pipes.

Keywords: Bauschinger effect, alternating deformation, pipe manufacturing process, yield point, elastic limit, microstructure, dislocations

Funding: The work was performed within the framework of the state task of IMET RAS No. 075-00715-22-00.

Acknowledgements: The authors express their gratitude to Radmir Ershatovich Mukhamedzhanov for valuable advice in preparing the article.

For citation: Adigamov R.R., Andreev V.A., Rogachev S.O., Fedotov E.S., Khadeev G.E., Yusupov V.S. Bauschinger effect during alternating deformation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 7, pp. 456–466. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-455-466>

СУТЬ ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА И ЕГО ПРИРОДА

Явление снижения сопротивления материала малым пластическим деформациям после предварительной пластической деформации противоположного знака, открытое в 1881 г., было названо эффектом Баушингера (по имени его первооткрывателя – И. Баушингера) [1 – 3]. Иными словами, после пластической деформации материал становится пластически анизотропным, т. е. обладает различными механическими свойствами при прямом и обратном нагружении [4]. При этом имеет место не только количественное различие в величине напряжения течения материала при прямом и противоположном направлениях нагружения – меняется и форма диаграммы деформации, например, на диаграмме может исчезать физический предел (площадка) текучести [5]. Эффект Баушингера проиллюстрирован на рис. 1.

Существует несколько подходов к объяснению природы эффекта Баушингера.

- Гипотеза, основанная на механике разрушения [6 – 10]. Согласно наиболее ранним представлениям, возникающие при неравномерной первичной деформации поликристалла дислокации обуславливают появление в отдельных кристаллах остаточных напряжений обратного знака (напряжения Гейна). Складываясь с рабочими напряжениями при перемене знака нагрузки, они приводят к снижению предела пропорциональности, упругости и текучести металла, вызывая тем самым более раннее пластическое течение [6]. Впоследствии гипотеза получила развитие, и эффект Баушингера объясняли влиянием ориентированных напряжений [11].

- Гипотеза, основанная на известных положениях физических основ пластической деформации [7, 12]. Экспериментальное наблюдение эффекта Баушингера

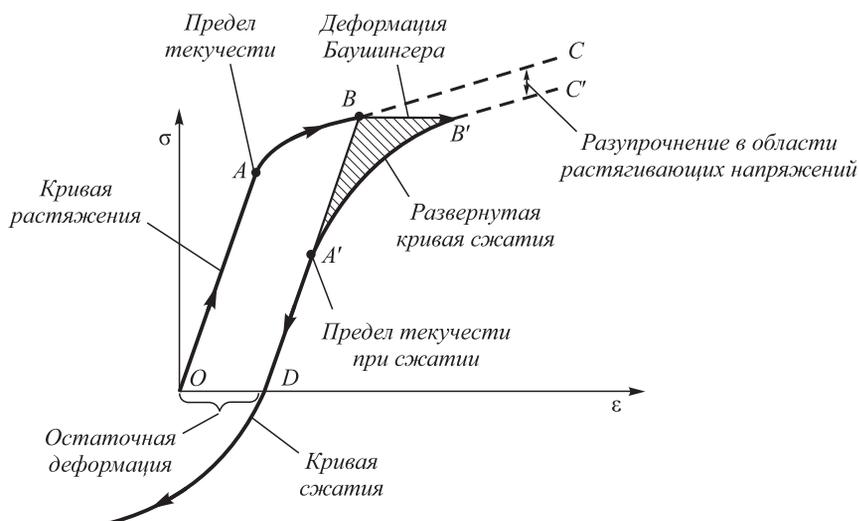


Рис. 1. Схематическое изображение эффекта Баушингера [6]

Fig. 1. Schematic representation of the Bauschinger effect [6]

ра не только в поликристаллических материалах, но и в монокристаллах, привело к альтернативной гипотезе природы эффекта [13, 14]. В связи с этим в настоящее время наиболее распространено объяснение эффекта Баушингера действием микронапряжений, образованных при генерировании источников Франка-Рида в дислокационных скоплениях при торможении дислокаций барьерами [12]. В процессе пластической деформации движению дислокаций может препятствовать ряд факторов, таких как взаимодействие дислокаций с другими дислокациями, с точечными дефектами, с дисперсными частицами второй фазы, с границами зерен, с атомами растворенных примесей. При изменении знака нагружения напряжения, образовавшиеся в дислокационных скоплениях, суммируются с внешними приложенными напряжениями, понижая тем самым сопротивление пластическому деформированию при обратном нагружении [6]. Кроме прочего, гипотеза подтверждается тем фактом, что в случае закрепления легкоподвижных дислокаций в дислокационных скоплениях атмосферами примесных атомов подвижность дислокаций уменьшается, и эффект Баушингера ослабевает [14].

- Недавно появилась гипотеза, согласно которой эффект Баушингера связан с остаточной деформацией кристаллической решетки, вызванной анизотропией упругой и пластической деформации в масштабе зерна. Так, в работе [15] продемонстрирована сильная корреляция между эволюцией остаточной деформации решетки группы зерен и изменением предела текучести образца, максимального напряжения и формой кривой напряжение – деформация в области малых деформаций при циклических испытаниях. Однако исследование было проведено только на одном материале – аустенитной нержавеющей стали типа AISI 316Н (08Х16Н11М3), что не позволяет оценить универсальность указанного механизма.

- Кроме этого, из литературы известны и другие гипотезы, как общепринятые, так и опровергнутые впоследствии [10, 15 – 17].

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТ БАУШИНГЕРА

В работах [18 – 21] отмечены следующие основные факторы, влияющие на проявление и характеристики эффекта Баушингера:

- степень предварительной деформации;
- состав, структура и свойства материала (в том числе размер зерна и тип кристаллической решетки);
- условия деформирования (скорость деформирования, вид напряженно-деформированного состояния, амплитуда знакопеременных нагружений);
- явление динамического деформационного старения;
- температура.

Далее рассмотрим подробно каждый из перечисленных выше факторов.

Влияние степени предварительной деформации

О том, как влияет степень предварительной деформации на эффект Баушингера, мнения ученых расходятся. Сам Баушингер считал, что уменьшение предела упругости при изменении знака нагружения тем больше, чем больше величина деформации при первом нагружении [2, 3]. Эффект снижения механических характеристик противоположного знака с увеличением начальных пластических деформаций отмечался, например, в работе [7].

Впоследствии авторы, исследовавшие поведение металлов и сплавов при различных степенях деформации [22, 23], утверждали, что эффект Баушингера наблюдается как при малых, так и при больших степенях деформации, вплоть до 100 % и более.

По мнению некоторых ученых, снижение механических характеристик при обратной деформации наблюдается только до определенной (критической) величины начальной пластической деформации. Например, в работе [24] отмечается предельная величина предварительной деформации для получения максимального эффекта Баушингера. Ее величина невелика и для некоторых сталей составляла 1,5 %. Эти результаты несколько отличались от полученных в работе [5], где при исследовании сталей марок Ст3, СХЛ-4, 09Г2 и сталей с пределом текучести $\sigma_{0,2} = 600 - 1200$ МПа эффект Баушингера уменьшался с увеличением степени деформации, а затем стабилизировался (рис. 2), начиная с некоторого значения пластической деформации порядка 1 % (здесь эффект Баушингера определяли по отношению $\sigma_{0,2}/\sigma_d$, где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести при обратном

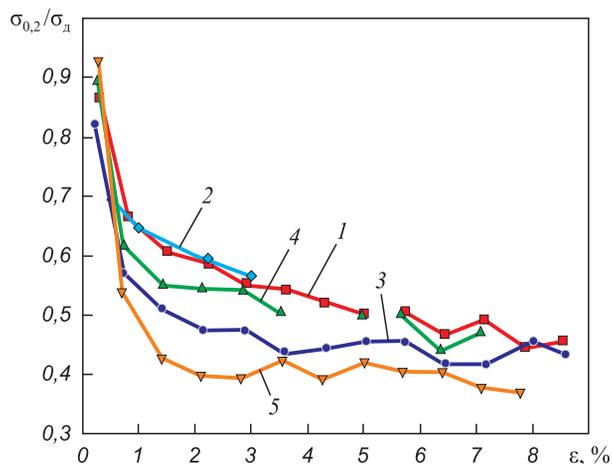


Рис. 2. Стабилизация эффекта Баушингера при увеличении степени предварительной деформации растяжением на сталях с $\sigma_{0,2} = 600 - 1200$ МПа [5]:
 1 – $\sigma_{0,2} = 700$; 2 – $\sigma_{0,2} = 780$; 3 – $\sigma_{0,2} = 800$;
 4 – $\sigma_{0,2} = 1000$; 5 – $\sigma_{0,2} = 1200$

Fig. 2. Stabilization of the Bauschinger effect with an increase in the degree of prestrain on steels with $\sigma_{0,2} = 600 - 1200$ MPa [5]:
 1 – $\sigma_{0,2} = 700$; 2 – $\sigma_{0,2} = 780$; 3 – $\sigma_{0,2} = 800$;
 4 – $\sigma_{0,2} = 1000$; 5 – $\sigma_{0,2} = 1200$

нагружении; σ_d – достигнутое напряжение при прямом нагружении). Аналогичный результат наблюдался и в работе [25].

В работе [26] отмечалось, что для стали марки 20 предварительное растяжение на 7,9 % привело при повторном сжатии к снижению предела пропорциональности на 71 %. Авторы работы [27] установили, что разупрочнение стали 30Г1Р наблюдается при степени деформации образцов не более 40 % после их предварительной осадки. Напротив, в работе [28] не обнаружено никакого статистически значимого влияния степени сдвиговой деформации на величину эффекта Баушингера при знакопеременном кручении цилиндрического образца.

Влияние состава, структуры и свойств сплава

При оценке влияния величины зерна на эффект Баушингера мнения ученых также различаются. Например, в работе [29] никакого влияния размера зерна на эффект Баушингера не отмечено. Напротив, в работе [30] было показано, что зависимость величины эффекта Баушингера от размера зерна наблюдается во всех металлах и сплавах, независимо от типа кристаллической решетки. Следует отметить, что оценку влияния зеренной структуры на эффект Баушингера корректно проводить только при отсутствии субструктуры, т. е. при плотности внутриверхних дислокаций много меньшей, чем зернограницных [31]. Поэтому отмеченные противоречия в результатах могут быть связаны с неучтенной в исследованиях субструктурой материала.

В работе [32] высказывается мнение о том, что эффект Баушингера выражен сильнее в сплавах, чем в чистых металлах. При увеличении массовой доли углерода или уровня легирования в железоуглеродистых сплавах эффект Баушингера усиливается. В частности, величина эффекта Баушингера возрастает с увеличением перлитной составляющей в сталях. В то же время проявление эффекта Баушингера при одном и том же химическом составе стали зависело от ее микроструктуры. Наблюдалось значительное различие в протекании пластической деформации в сталях с зернистой и пластинчатой формой цемента. Склонность к проявлению эффекта Баушингера высокопрочной стали марки 70 со структурой зернистого перлита отмечена в работе [33]. В работе [34] установлено, что вне зависимости от схемы нагружения склонность стали 06Г2ФБ к проявлению эффекта Баушингера при феррито-бейнитной структуре выше, чем при феррито-перлитной (здесь для оценки эффекта Баушингера использовали параметр, равный относительноному уменьшению предела текучести, когда предварительная деформация сменяется обратной деформацией: $\beta_\sigma = \frac{|\sigma_p| - |\sigma_r|}{\sigma_p}$, где σ_r – предел

текучести при обратной деформации; σ_p – наибольшее напряжение, достигаемое при предварительной деформации).

В работе [28] при знакопеременном кручении цилиндрического образца величина эффекта Баушингера зависела от марки стали, причем эффект Баушингера в большей степени проявлялся для стали 30ХГСА, в меньшей – для стали ШХ15.

В работе [35] показано, что характер изменения предела текучести металла после трубного передела одинаков для трубных сталей различных классов прочности, вне зависимости от химического состава, структурных составляющих, типа формовки (ЖСО или УОЕ) и места вырезки образцов (90° или 180° относительно сварного шва). При этом в данной работе строгой зависимости между классом прочности стали и направлением изменения предела текучести в ходе трубного передела не обнаружено. Величина и направление изменения предела текучести зависели от исходных характеристик листов и параметров трубного передела.

Влияние условий деформирования

Зависимость эффекта Баушингера от направления приложенной нагрузки была показана при исследовании трубных сталей класса прочности Х70 [36]. В данной работе эффект Баушингера, возникающий при последующем обратном растяжении после сжатия, был более выражен при направлении действия нагрузки под углом 45° от направления прокатки к поперечному направлению. Авторы объясняли это облегчением активации скольжения дислокаций в таком направлении. Кроме этого, в работе [24] сделан вывод, что эффект Баушингера зависит от условий первоначального деформирования. Так, был проведен эксперимент по деформированию технического алюминия по схеме растяжение – сжатие – растяжение с различной скоростью нагружения. По полученным результатам показано, что при быстром нагружении со скоростью V_2 при изменении знака нагружения наблюдается эффект Баушингера. При нагружении растяжением со скоростью $V_1 < V_2$ (на 5 порядков) и последующим сжатием со скоростью V_2 наблюдается повышение сопротивления началу пластического деформирования по сравнению с его начальным значением, т. е. протекает явление, обратное эффекту Баушингера. Полученный результат можно объяснить на основе теоретических представлений из работы [6]. Факторы, препятствующие движению дислокаций в процессе пластической деформации, затрудняют движение дислокаций и в обратном направлении при изменении знака приложенного напряжения. Поэтому изменение степени влияния этих факторов будет сказываться на величине предела пропорциональности поликристалла, т. е. пластическая деформация может начаться или раньше, или позже, чем при не-

прерывном нагружении одного знака. Также в механике сплошных сред (дислокационная кинетика пластического деформирования из теорий упругости и пластичности) математически описывается причина повышения напряжения текучести.

Уменьшение относительной величины эффекта Баушингера с увеличением скорости деформации по схеме растяжение – сжатие при заданной деформации на примере мягкой стали показано в работе [37]. В этой же работе приведена зависимость данного эффекта от амплитуды остаточных деформаций при начальном нагружении. Напротив, в работе [21] при изучении сплава Ti6Al4V эффект Баушингера был более выражен для высоких скоростей деформации кручением.

При рассмотрении эффекта Баушингера в случае деформации изгибом или кручением, сопровождающихся образованием остаточных макроскопических напряжений по сечению деформированного образца, следует учитывать их влияние на развитие эффекта Баушингера [14].

В работах [38 – 40] качественно показано проявление эффекта Баушингера при сложном нагружении. Так, в работах [38, 39] тонкостенный трубчатый образец растягивался и закручивался, затем крутящий момент снимался, после чего увеличивалась растягивающая сила. В результате на последнем этапе нагружения наблюдалось уменьшение остаточной деформации, приобретенной образцом от крутящего момента, т. е. происходила пластическая раскрутка образца. Уменьшение остаточной деформации, накопленной на первом этапе нагружения, также наблюдалось при сложной деформации трубчатых образцов стали марки 45. Образцы сначала закручивались на величину деформации больше предела упругости, разгружались, а затем растягивались, или наоборот, очередность приложения нагрузки менялась.

Явление динамического деформационного старения

Оно уменьшает эффект Баушингера [21]. В работах [34, 41] показана склонность трубной стали 06Г2ФБ к деформационному старению как при статическом, так и динамическом нагружении. Деформационное старение привело к снижению показателя деформационного упрочнения при статическом растяжении, причем этот эффект более выражен для феррито-бейнитной структуры, чем для феррито-перлитной. При приложении знакопеременной деформации (имитация на комплексе Gleeble 3800), включающей одноосное растяжение и сжатие, наблюдалась склонность стали 06Г2ФБ к проявлению эффекта Баушингера. Существенное развитие деформационного старения происходило также при знакопеременной деформации. Наблюдаемый при этом рост предела текучести наиболее значителен, если сталь имела феррито-бейнитную структуру, а пред-

варительное нагружение проводилось по схеме сжатие + растяжение. В нагретых образцах (250 °С, 1 ч), предварительно деформированных по схеме растяжение + сжатие, прирост предела текучести невелик. Это связано с тем, что на упрочнение, связанное со старением, накладывается разупрочнение за счет изменения знака деформации после старения. Параметр эффекта Баушингера при знакопеременной деформации как со старенными образцами, так и образцов без старения, сопоставим.

Температура

Эффект Баушингера в холоднодеформированной углеродистой и легированной стали может быть в значительной степени подавлен при проведении низкотемпературных (100 – 250 °С) нагревов между прямым и обратным нагружением [14, 18]. Так, уменьшение эффекта Баушингера наблюдали в работе [14] на примере холоднодеформированной стали 70С2ХА, деформированной знакопеременным изгибом с промежуточными низкотемпературными нагревами между прямым и обратным нагружением (эффект Баушингера оценивался, как отношение условных пределов упругости при обратном и прямом нагружении для остаточной деформации 0,03 %). В этой же работе показано, что эффект Баушингера при изгибе обусловлен влиянием двух факторов, имеющих не только различную природу, но и разную термическую устойчивость:

- наличием легкоподвижных дислокаций, генерированных источниками Франка-Рида и заторможенных барьерами при прямом нагружении, а также напряжений в этих дислокационных скоплениях, совпадающих по знаку с напряжениями обратного изгиба;
- наличием остаточных макроскопических напряжений, образованных при пластической деформации изгибом, и последующем разгрузении упруго-пластически деформированного образца.

Остаточные макроскопические напряжения, а также напряжения в дислокационных скоплениях при низкотемпературных промежуточных нагревах (до 200 °С) релаксируют незначительно, в то время как легкоподвижные дислокации, образованные при прямом нагружении и заторможенные барьерами, при низкотемпературных нагревах (начиная с 75 °С) относительно легко закрепляются примесными атомами. Именно легкоподвижные дислокации, перемещающиеся при изменении знака нагружения уже при небольших напряжениях, являются причиной эффекта Баушингера. Таким образом, снижение эффекта Баушингера при низкотемпературных промежуточных нагревах связано с процессом закрепления легкоподвижных дислокаций в дислокационных скоплениях атмосферами примесных атомов углерода и азота (статическое деформационное старение).

ПРОБЛЕМА ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА ПРИ ЗНАКОПЕРЕМЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Эффект Баушингера имеет большое значение и учитывается, в частности, при изучении вопросов усталостной прочности материалов при знакопеременных нагрузках (растяжение + сжатие, прямой и обратный изгиб или кручение и др.). Эффект Баушингера в разной степени присущ всем металлам и сплавам [22, 42], хотя наиболее сильно проявляется на сталях [7]. Поэтому он является одним из факторов, влияющих на качество готовых металлических изделий, подвергающихся знакопеременному нагружению при изготовлении. Например, технологический процесс производства сварных нефтегазовых труб большого диаметра включает ряд операций, связанных со знакопеременным деформационным воздействием на металл [43].

При формовке нефтегазовых труб создаются различные градиенты напряжений и деформаций по сечению заготовки. Процедура распрямления образца для последующего испытания растяжением вносит дополнительно цикл растяжения – сжатия во внешние и внутренние волокна металла. В результате разные слои материала приобретают различные свойства [6].

Вопросы определения напряжений и деформаций при наличии конечных областей пластических деформаций в тех случаях, когда внешние нагрузки прикладываются однократно, в настоящее время хорошо изучены. Однако в тех многочисленных в инженерной практике случаях, когда внешние силы прикладываются многократно (в том числе с изменением знака), поведение упругопластической системы существенно отличается от случая однократного нагружения, в том числе проявлением эффекта Баушингера [26].

При формовке труб принципиальным отличием от классической схемы растяжение – сжатие является неодинаковая по величине и знаку деформация слоев металла по сечению. Это само по себе определяет наличие высоких остаточных напряжений. Характер влияния степени деформации растяжением зависит от структуры и характеристик упрочнения стали.

Проблема снижения предела текучести при формовке труб сегодня особенно актуальна в связи с расширением использования новых сталей, для повышения прочности которых используются все известные механизмы упрочнения [6]. Величина снижения предела текучести, как рассмотрено выше, зависит от ряда параметров, включая химический состав стали, параметры прокатки и охлаждения, возможность деформационного старения и т. д. Проблема влияния эффекта Баушингера особенно проявляется при освоении производства контролируемой прокаткой малоперлитных микролегированных сталей, в которых около половины прироста предела текучести за счет мелкого зерна, субструктуры и дисперсных частиц терялось при формовке труб большого диаметра.

Многочисленные данные по высокопрочным трубам классов прочности X70 – X80, а также более прочным перспективным (X100 – X120) показывают, что при оценке прочности и надежности по пределу текучести необходимо принимать во внимание влияние эффекта Баушингера при изготовлении труб и испытании материала.

В работе [44] отмечается негативное влияние эффекта Баушингера на процесс неупругого деформирования поликристаллического материала, так как различные значения предела текучести на «прямом» и «обратном» этапах нагружения существенно затрудняют определение диапазона рабочих нагрузок для материала. Однако эффект Баушингера, по-видимому, может играть как положительную, так и отрицательную роль. С одной стороны, эффект Баушингера оказывает отрицательный эффект, снижая уровень механических свойств конечного продукта ниже требуемого. С другой стороны, создает определенный запас пластичности деформируемого материала в процессе формовки, что отмечено, например, в работе [45]. Тем не менее, для рационального использования эффекта Баушингера в технологическом процессе изготовления изделий требуется понимание его природы, знание влияющих факторов, а также методик его измерения.

Общей тенденцией является усиление степени «разупрочнения» более прочных сталей при переделе лист – труба, что обуславливается большей величиной остаточных напряжений. Тем не менее, величина эффекта при равной прочности во многом определяется и типом микроструктуры (т. е. связана с действующими механизмами упрочнения). Так, увеличение доли субструктурного упрочнения феррита особенно усиливает эффект «разупрочнения» при формовке [6].

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТА БАУШИНГЕРА

Для определения эффекта Баушингера обычно проводят стандартные испытания образцов на растяжение с последующим их сжатием (последовательность нагружения может выбираться, исходя из условий деформирования материала в процессе эксплуатации). Количественную величину эффекта Баушингера (параметр Баушингера) часто находят как отношение условного предела текучести при сжатии к значению напряжения предварительного растяжения. Снижение параметра свидетельствует об усилении эффекта. При этом, как правило, испытывают на растяжение – сжатие статически необходимое количество цилиндрических образцов. Согласно традиционному способу, предварительно растягивают длинномерные стандартные образцы до различных степеней пластических деформаций. После этого из данных образцов вырезают новые короткие образцы для испытания на сжатие согласно стандарту, в целях определения условного предела текучести на сжатие с допуском на пластическую дефор-

мацию 0,2 % [46]. Выполнение таких испытаний связано с большими затратами времени и материалов. В работе [46] предложен способ оценки эффекта Баушингера, заключающийся в испытании одного длинномерного образца на растяжение с последующим сжатием его в специальном устройстве, позволяющем деформировать предварительно растянутый образец без потери устойчивости его рабочей части в условиях линейного напряженного состояния.

Существует и много других методик измерения эффекта Баушингера. Так, в работе [47] приводятся методики определения зависимости параметра Баушингера от эквивалентной деформации (при моделировании операций листовой штамповки) для сплава Д16Т. В работах [47, 48] представлены методики определения эффекта Баушингера для различных схем механических испытаний: сжатие + растяжение, сжатие изгибом + растяжение, изгиб + обратный изгиб, реверсивное кручение, прокатка + волочение.

Также существует и несколько критериев оценки эффекта Баушингера, кроме рассмотренного выше. Распространенными являются отношение условных пределов упругости при обратном и прямом нагружении [14] и отношение $\frac{\sigma_p - \sigma_r}{\sigma_p - \sigma_0}$, где σ_r – предел текучести при обратной деформации; σ_0 – предел текучести при предварительной деформации; σ_p – наибольшее напряжение, достигаемое при предварительной деформации [49, 50].

В работе [51] подчеркивалась количественная зависимость эффекта Баушингера от допуска на остаточную деформацию. В работе [25] представлены результаты измерения эффекта Баушингера при многократном знакопеременном нагружении при растяжении – сжатии тонкостенного трубчатого стального образца. Использовался тонкостенный трубчатый образец из стали 45 в состоянии поставки, который имел толщину стенки $h = 1$ мм, радиус срединной поверхности поперечного сечения $R = 15,5$ мм и длину рабочей части $l = 110$ мм. В результате испытания образец подвергался многократному знакопеременному нагружению через равные приращения (0,5 %) при растяжении с последующим знакопеременным нагружением на $\sim 0,75 - 0,9$ % при сжатии. Опыт в режиме непрерывного деформирования продолжался 8 ч. Было установлено, что с уменьшением допуска на остаточную деформацию параметр, характеризующий эффект Баушингера, уменьшался, т. е. сам эффект усиливался. Усиление эффекта Баушингера при уменьшении допуска на остаточную деформацию отмечено также и в работе [14].

В работе [28] цилиндрический образец подвергали кручению до достижения сдвиговой деформации, равной 0,1 (точка *B* на рис. 3). Затем образец разгружали, после чего закручивали в прежнем направлении. Кривая упрочнения *CB'G* является продолжением кривой упрочнения *AB*. Напротив, когда повторное кручение

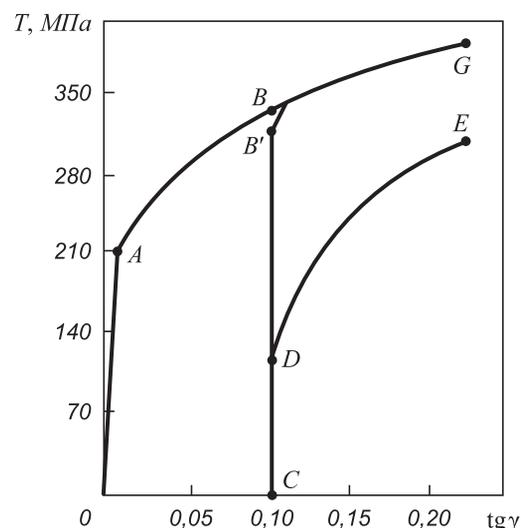


Рис. 3. Эффект Баушингера при знакопеременном кручении (T – интенсивность касательных напряжений) [28]

Fig. 3. Bauschinger effect under alternating torsion (T – the intensity of shear stresses) [28]

производили в обратном направлении, то кривая упрочнения *CDE* располагалась ниже кривой *ABG*, что вызывалось эффектом Баушингера. Количественно эффект Баушингера оценивали параметром, который рассчитывали, как отношение отрезков $\beta = CD/CB$. Однако отсутствие в работе данных о допуске на остаточную деформацию затрудняет анализ результатов.

В работе [5] показано, что при исследовании эффекта Баушингера в условиях растяжения – сжатия существенную роль играет методика проведения испытаний. Так, в работе [52] исследовался эффект Баушингера на стали марки Ст3. Испытания проводились в два этапа. На первом этапе образец подвергался осевому растяжению до получения заданного удлинения. Затем, после полной разгрузки, из этого образца вырезались цилиндры с плоскопараллельными торцами, которые подвергались осевому сжатию. Напротив, в работе [5] проводились испытания трехкратных цилиндрических образцов на сервогидравлической испытательной машине «INSTRON 1255» с использованием гидравлических захватов, что позволяло производить и прямое, и обратное нагружение на одном и том же образце и устраняло целый ряд источников погрешности результатов:

- различные форма и размер образцов;
- условия закрепления;
- методы измерения деформации;
- влияние процесса изготовления образца после получения им предварительной деформации;
- время между испытаниями, которое может привести к старению материала.

Таким образом, эффект Баушингера измерялся при прямом и обратном нагружении одного и того же образца. При проведении испытаний был использован метод

«зондирования», при котором образец нагружается до некоторой заданной деформации, затем производится разгрузка и нагружение противоположного знака до остаточной деформации 0,2 %, необходимой для определения текучести (зондирование). Далее продолжается прямое деформирование до достижения следующей остаточной деформации, снова производится зондирование и т. д. Использование этого метода основано на допущении, что остаточная деформация 0,2 % противоположного знака не оказывает влияния на дальнейшее деформирование материала. Эффект Баушингера характеризовался отношением $\sigma_{0,2}/\sigma_d$, где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести при обратном нагружении; σ_d – достигнутое напряжение при прямом нагружении. Проведенное исследование эффекта Баушингера на стали марки Ст3 дало результаты, существенно отличающиеся от данных работы [22], где эффект был выражен значительно заметнее.

Выводы

Анализируя работы, посвященные исследованию эффекта Баушингера, можно сделать некоторые выводы.

Эффект Баушингера различный у разных металлов и наблюдается как у поликристаллических металлов, так и у монокристаллов, причем у чистых металлов он проявляется в меньшей степени, чем у сплавов.

Эффект Баушингера зависит от степени предварительной (предшествующей) деформации противоположного знака.

Эффект Баушингера не устраняется длительным перерывом между нагружением и предшествующей раз-

грузкой, однако он может быть устранен или уменьшен путем промежуточного нагревания. При этом для каждого материала существует минимальная температура и продолжительность нагревания, при которых эффект исчезает.

Эффект Баушингера усиливается с увеличением прочности стали, что обуславливается большей величиной остаточных напряжений. Величина эффекта при равной прочности во многом определяется типом микроструктуры (которая, в свою очередь, определяет разные механизмы упрочнения).

С ростом допуска на остаточную деформацию параметр, характеризующий эффект Баушингера, увеличивается, т. е. сам эффект ослабевает. Измерение эффекта Баушингера целесообразно проводить на одном и том же образце путем стандартного испытания на растяжение на заданную степень деформации с последующим сжатием (или наоборот). Количественно эффект Баушингера целесообразно оценивать по нескольким показателям. Например, по отношению условных пределов текучести при обратном и прямом нагружении и отношению условного предела текучести при сжатии к значению напряжения предварительного растяжения.

Эффект Баушингера играет как положительную, так и отрицательную роль при производстве металлических изделий, в частности, нефтегазовых труб. С одной стороны, эффект Баушингера оказывает отрицательный эффект, снижая уровень механических свойств конечного продукта ниже требуемого. С другой стороны, создает определенный запас пластичности деформируемого материала в процессе формовки, а также в процессе строительства трубопроводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- Masing G. Zur Heyn'schen Theorie der Verfestigung der Metalle durch verborgen elastische Spannungen. In: *Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern*. Harries C.D. ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 1924. P. 231–239. https://doi.org/10.1007/978-3-642-99663-4_17
- Bauschinger J. Über die Veränderung der Elastizitätsgrenze und der Festigkeit des Eisens und Stahls durch Strecken und Quetschen, durch Erwärmen und Abkühlen und durch oftmals wiederholte Beanspruchung // *Mittheilungen aus dem Mechanisch-Technischen Laboratorium der Königlichen Technischen Hochschule in München*. 1886. Vol. 13. P. 1–115.
- Bauschinger J. Ueber die Veränderung der Elasticitätsgrenze und dea Elasticitätamoduls verschiedener Metalle // *Zivilingenieur*. 1881. Vol. 27. P. 289–348.
- Skelton R.P. Bauschinger yield in the range 400 – 1025 °C during cyclic deformation of high temperature alloys // *Materials at High Temperatures*. 2013. Vol. 30. P. 241–260. <https://doi.org/10.3184/096034013X13807096276564>
- Нигматуллин В.И. Экспериментальное исследование влияния предварительной пластической деформации на поведение конструкционных сталей при обратном нагружении // *Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова*. 2011. № 60. С. 119–132.
- Харитонов В.А., Малолеткова Е.О. Влияние эффекта Баушингера на прочностные характеристики высокопрочных труб // *Обработка сплошных и слоистых материалов*. 2010. № 36. С. 28–33.
- Masing G. On Heyn's theory of hardening of metals through hidden elastic stresses. In: *Scientific publications from the Siemens group*. Harries C.D. ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 1924, pp. 231–239. (In Germ.). https://doi.org/10.1007/978-3-642-99663-4_17
- Bauschinger J. Über die Veränderung der Elastizitätsgrenze und der Festigkeit des Eisens und Stahls durch Strecken und Quetschen, durch Erwärmen und Abkühlen und durch oftmals wiederholte Beanspruchung. *Mittheilungen aus dem Mechanisch-Technischen Laboratorium der Königlichen Technischen Hochschule in München*. 1886, vol. 13, pp. 1–115. (In Germ.).
- Bauschinger J. Ueber die Veränderung der Elasticitätsgrenze und dea Elasticitätamoduls verschiedener Metalle. *Zivilingenieur*. 1881, vol. 27, pp. 289–348. (In Germ.).
- Skelton R.P. Bauschinger yield in the range 400 – 1025 °C during cyclic deformation of high temperature alloys. *Materials at High Temperatures*. 2013, vol. 30, pp. 241–260. <https://doi.org/10.3184/096034013X13807096276564>
- Nigmatullin V.I. Experimental study of the effect of preliminary plastic deformation on structural steels behavior under reverse loading. *Trudy TsNII im. akad. A.N. Krylova*. 2011, no. 60, pp. 119–132. (In Russ.).
- Kharitonov V.A., Maloletkova E.O. Influence of the Bauschinger effect on strength characteristics of high-strength pipes. *Obrabotka sploshnykh i sloistykh materialov*. 2010, no. 36, pp. 28–33. (In Russ.).

7. Линчевский П.А., Новожилов С.В., Кудряков М.Б. Совершенствование технологии обработки металлов резанием и пластическим деформированием с учетом использования эффекта Баушингера // Труды Одесского политехнического университета. 2008. № 2. С. 73–76.
7. Linchevskii P.A., Novozhilov S.V., Kudryakov M.B. Improving the technology of metal processing by cutting and plastic deformation with the use of the Bauschinger effect. *Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2008, no. 2, pp. 73–76. (In Russ.).
8. Xiaoyu H., Chao W., Margolin H., Nourbakhsh S. The Bauschinger effect and the stresses in a strained single crystal // Scripta Metallurgica et Materialia. 1992. Vol. 27. No. 7. P. 865–870. [https://doi.org/10.1016/0956-716X\(92\)90407-6](https://doi.org/10.1016/0956-716X(92)90407-6)
8. Xiaoyu H., Chao W., Margolin H., Nourbakhsh S. The Bauschinger effect and the stresses in a strained single crystal. *Scripta Metallurgica et Materialia*. 1992, vol. 27, no. 7, pp. 865–870. [https://doi.org/10.1016/0956-716X\(92\)90407-6](https://doi.org/10.1016/0956-716X(92)90407-6)
9. Wood W.A., Dewsnap N. Internal stresses in metals // Nature. 1948. Vol. 161. P. 682–683. <https://doi.org/10.1038/161682b0>
9. Wood W.A., Dewsnap N. Internal stresses in metals. *Nature*. 1948, vol. 161, pp. 682–683. <https://doi.org/10.1038/161682b0>
10. Abel A., Muir H. The Bauschinger effect and discontinuous yielding // Philosophical Magazine. 1972. Vol. 26. P. 489–504.
10. Abel A., Muir H. The Bauschinger effect and discontinuous yielding. *Philosophical Magazine*. 1972, vol. 26, pp. 489–504.
11. Ровинский Б.М., Синайский В.Л. О природе эффекта Баушингера // Известия АН СССР. Metallургия и топливо. 1959. № 6. С. 137–141.
11. Rovinskii B.M., Sinaiskii V.L. On the nature of the Bauschinger effect. *Izvestiya AN SSSR. Metallurgiya i toplivo*. 1959, no. 6, pp. 137–141. (In Russ.)
12. Brown L.M. Orowan's explanation of the Bauschinger effect // Scripta Metallurgica. 1977. Vol. 11. No. 2. P. 127–131. [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(77\)90291-5](https://doi.org/10.1016/0036-9748(77)90291-5)
12. Brown L.M. Orowan's explanation of the Bauschinger effect. *Scripta Metallurgica*. 1977, vol. 11, no. 2, pp. 127–131. [https://doi.org/10.1016/0036-9748\(77\)90291-5](https://doi.org/10.1016/0036-9748(77)90291-5)
13. Orowan E. Causes and effects of internal stresses. In: Internal Stresses and Fatigue in Metals. Proceedings of General Motors Symposium. Rassweiler G.M., Grube W.L. eds. Amsterdam: Elsevier, 1959. P. 59–80.
13. Orowan E. Causes and effects of internal stresses. In: *Internal Stresses and Fatigue in Metals. Proceedings of General Motors Symposium*. Rassweiler G.M., Grube W.L. eds. Amsterdam: Elsevier, 1959, pp. 59–80.
14. Грачев С.В., Казяева И.Д., Пумпянский Д.А. Кинетика термической устойчивости эффекта Баушингера в холоднодеформированной стали // Физика металлов и металловедение. 2004. Т. 97. № 2. С. 104–107.
14. Grachev S.V., Kazyaeva I.D., Pumpyanskiy D.A. Thermal stability of the Bauschinger effect in the cold-deformed steel. *Physics of Metals and Metallography*. 2004, vol. 97, no. 2, pp. 217–219.
15. Mamun A.A., Moat R.J., Kelleher J., Bouchard P.J. Origin of the Bauschinger effect in a polycrystalline material // Materials Science and Engineering: A. 2017. Vol. 707. P. 576–584. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.09.091>
15. Mamun A.A., Moat R.J., Kelleher J., Bouchard P.J. Origin of the Bauschinger effect in a polycrystalline material. *Materials Science and Engineering: A*. 2017, vol. 707, pp. 576–584. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.09.091>
16. Sleeswyk A.W., James M.R., Plantinga D.H., Maathuis W.S.T. Reversible strain in cyclic plastic deformation // Acta Metallurgica. 1978. Vol. 26. No. 8. P. 1265–1271. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(78\)90011-1](https://doi.org/10.1016/0001-6160(78)90011-1)
16. Sleeswyk A.W., James M.R., Plantinga D.H., Maathuis W.S.T. Reversible strain in cyclic plastic deformation. *Acta Metallurgica*. 1978, vol. 26, no. 8, pp. 1265–1271. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(78\)90011-1](https://doi.org/10.1016/0001-6160(78)90011-1)
17. Mughrabi H. Dislocation wall and cell structures and long-range internal stresses in deformed metal crystals // Acta Metallurgica. 1983. Vol. 31. No. 9. P. 1367–1379. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(83\)90007-X](https://doi.org/10.1016/0001-6160(83)90007-X)
17. Mughrabi H. Dislocation wall and cell structures and long-range internal stresses in deformed metal crystals. *Acta Metallurgica*. 1983, vol. 31, no. 9, pp. 1367–1379. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(83\)90007-X](https://doi.org/10.1016/0001-6160(83)90007-X)
18. Грачев С.В., Григорьева В.Н. Термическая устойчивость эффекта Баушингера в закаленной и отпущенной стали // Физико-химическая механика материалов. 1968. Т. 4. № 5. С. 544–547.
18. Grachev S.V., Grigor'eva V.N. Thermal stability of the Bauschinger effect in hardened and tempered steel. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov*. 1968, vol. 4, no. 5, pp. 544–547. (In Russ.).
19. Пыхтунова С.В. К вопросу об эффекте Баушингера // Качество в обработке материалов. 2015. № 1. С. 75–77.
19. Pykhtunova S.V. On the issue of the Bauschinger effect. *Kachestvo v obrabotke materialov*. 2015, no. 1, pp. 75–77. (In Russ.).
20. Peirs J., Verleysen P., Degrieck J. Study of the dynamic Bauschinger effect in Ti6Al4V by torsion experiments // EPJ Web of Conferences. 2012. Vol. 26. Article 01023. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20122601023>
20. Peirs J., Verleysen P., Degrieck J. Study of the dynamic Bauschinger effect in Ti6Al4V by torsion experiments. *EPJ Web of Conferences*. 2012, vol. 26, article 01023. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20122601023>
21. Richards M.D., Van Tyne C.J., Matlock D.K. The influence of dynamic strain aging on resistance to strain reversal as assessed through the Bauschinger effect // Materials Science and Engineering: A. 2011. Vol. 528. No. 27. P. 7926–7932. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.07.015>
21. Richards M.D., Van Tyne C.J., Matlock D.K. The influence of dynamic strain aging on resistance to strain reversal as assessed through the Bauschinger effect. *Materials Science and Engineering: A*. 2011, vol. 528, no. 27, pp. 7926–7932. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.07.015>
22. Бобонец И.И., Гиндин И.А., Неклюдов И.М. Влияние программированного упрочнения на эффект Баушингера меди и алюминия // Известия АН СССР. Металлы. 1967. № 6. С. 156–159.
22. Bobonets I.I., Gindin I.A., Neklyudov I.M. Influence of programmed hardening on the Bauschinger effect of copper and aluminum. *Izvestiya AN SSSR. Metally*. 1967, no. 6, pp. 156–159. (In Russ.).
23. Васильев Д.М. О природе эффекта Баушингера. В книге: Некоторые проблемы прочности твердого тела. Москва: Издательство АН СССР, 1959. С. 37–48.
23. Vasil'ev D.M. On the nature of the Bauschinger effect. In: *Some Problems of Solid Strength*. Moscow: Izdatel'stvo AN SSSR, 1959, pp. 37–48. (In Russ.).
24. Saks G., Shoji H. Zug-Druckversuche an Messingkristallen (Bauschingerereffekt) // Zeitschrift für Physik. 1927. Vol. 45. P. 776–796. <https://doi.org/10.1007/BF01329555>
24. Saks G., Shoji H. Zug-Druckversuche an Messingkristallen (Bauschingerereffekt). *Zeitschrift für Physik*. 1927, vol. 45, pp. 776–796. (In Germ.). <https://doi.org/10.1007/BF01329555>
25. Зубчанинов В.Г., Алексеев А.А., Гульятев В.И. Исследование эффекта Баушингера и границы текучести при упругопластическом деформировании металлов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2013. № 1. С. 94–105.
25. Zubchaninov V.G., Alekseev A.A., Gul'tyaev V.I. Investigation of the Bauschinger effect and the yield boundary during elastoplastic deformation of metals. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*. 2013, no. 1, pp. 94–105. (In Russ.).

26. Москвитин В.В. Пластичность при переменных нагрузениях. Москва: Издательство МГУ, 1966. 263 с.
27. Квалиметрическая оценка производства автомобильного крепежа: Монография / Д.М. Закиров, Г.Ш. Рубин, И.Ю. Мезин, А.В. Сабдаш, С.П. Васильев, В.В. Чукин, С.С. Скворцова. Магнитогорск: МГТУ, 2007. 158 с.
28. Богатов А.А., Пузырев С.С. Особенности формоизменения и упрочнения металла при обработке давлением со знакопеременной деформацией // Производство проката. 2013. № 3. С. 2–8.
29. Woolley R.L. The Bauschinger effect in some face-centered and body-centered cubic metals // *Philosophical Magazine*. 1953. Vol. 44. P. 597–618.
30. Ратнер С.И., Данилов Ю.С. Изменение пределов пропорциональности и текучести при повторном нагружении // Заводская лаборатория. 1950. № 4. С. 46–47.
31. Trelewicz J.R., Schuh C.A. The Hall–Petch breakdown in nanocrystalline metals: A crossover to glass-like deformation // *Acta Materialia*. 2007. Vol. 55. No. 17. P. 5948–5958. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.07.020>
32. Черняк Н.И., Гаврилов Д.А. Сопротивление деформированию металлов при повторном статическом нагружении. Киев: Наукова думка, 1971. 136 с.
33. Манин В.П., Пыхтунова С.В. Влияние накопленной деформации на твердость и сопротивление деформации при острении дюбелей способом холодной поперечно-клиновой прокатки // В сборнике: Обработка сплошных и слоистых материалов. Магнитогорск, 2005. С. 71–73.
34. Смирнов М.А., Ахмедьянов А.М., Варнак О.В., Мальцева А.Н. Склонность низкоуглеродистой трубной стали к проявлению эффекта Баушингера // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». 2015. Т. 15. № 2. С. 26–32.
35. Khadeev G.E. Effect of multistage deformation during the pipe manufacturing on mechanical properties of steels strength grade X70–X80. In: *Proceedings of the 8th Int. Conf. on Modeling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking (STEELSIM 2019)*. August 13–15, 2019, Toronto, Ont., Canada. 2019. P. 347–357.
36. Kim H.L., Park S.H. Loading direction dependence of yield-point phenomenon and Bauschinger effect in API X70 steel sheet // *Metals and Materials International*. 2020. Vol. 26. P. 14–24. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00325-z>
37. Скрипняк В.А. Моделирование эффекта Баушингера на основе дислокационной кинетики пластической деформации // В сборнике: Всесоюзный семинар по деформационному упрочнению сталей и сплавов. Барнаул: Издательство АГУ, 1981. С. 54.
38. Рычков Б.А. Сложная деформация стали 45 // В сборнике: К проблеме механики реального твердого тела. Фрунзе: Издательство Илим, 1984. С. 66–78.
39. Фейгин М. Неупругое поведение при совместном действии растяжения и кручения // *Механика: Сборник переводов*. 1956. № 3. С. 125–139.
40. Комарцов Н.М., Лужанская Т.А., Рычков Б.А. Эффект Баушингера при сложном нагружении // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2010. Т. 15. № 3. С. 853–855.
41. Смирнов М.А., Пышминцев И.Ю., Варнак О.В., Мальцева А.Н., Гойхенберг Ю.Н. Исследование склонности низкоуглеродистой стали к деформационному старению и проявлению эффекта Баушингера // *Сталь*. 2016. № 1. С. 39–45.
42. Kostryzhev A.G., Strangwood M. Bauschinger Effect in Microalloyed Steels: Part I. Dependence on Dislocation-Particle Interaction // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2010. Vol. 41. P. 1399–1408. <https://doi.org/10.1007/s11661-010-0196-4>
43. Самусев С.В., Жигулев Г.П., Скрипаленко М.М., Фадеев В.А. Исследование параметров шаговой формовки заготовки при производстве труб большого диаметра на линии ТЭСА 1420 // *Черные металлы*. 2017. № 9. С. 73–77.
26. Moskvitin V.V. *Plasticity under Variable Loading*. Moscow: MSU Publ., 1966. 263 p. (In Russ.).
27. Zakirov D.M., Rubin G.Sh., Mezin I.Yu., Sabdash A.V., Vasil'ev S.P., Chukin V.V., Skvortsova S.S. *Qualimetric Assessment of Automotive Fasteners Production: Monograph*. Magnitogorsk: MSTU, 2007. 158 p. (In Russ.).
28. Bogatov A.A., Puzyrev S.S. Features of shaping and hardening of metal during pressure treatment with sign-variable deformation. *Proizvodstvo prokata*. 2013, no. 3, pp. 2–8. (In Russ.).
29. Woolley R.L. The Bauschinger effect in some face-centered and body-centered cubic metals. *Philosophical Magazine*. 1953, vol. 44, pp. 597–618.
30. Ratner S.I., Danilov Yu.S. Changes in proportionality limit and yield point under repeated loading. *Zavodskaya laboratoriya*. 1950, no. 4, pp. 46–47. (In Russ.).
31. Trelewicz J.R., Schuh C.A. The Hall–Petch breakdown in nanocrystalline metals: A crossover to glass-like deformation. *Acta Materialia*. 2007, vol. 55, no. 17, pp. 5948–5958. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.07.020>
32. Chernyak N.I., Gavrilov D.A. *Resistance to Deformation of Metals under Repeated Static Loading*. Kiev: Naukova dumka, 1971, 136 p. (In Russ.).
33. Manin V.P., Pykhtunova S.V. Influence of accumulated deformation on hardness and resistance to deformation when sharpening dowels by cold cross-wedge rolling. In: *Processing of Solid and Laminated Materials*. Magnitogorsk, 2005, pp. 71–73. (In Russ.).
34. Smirnov M.A., Akhmed'yanov A.M., Varnak O.V., Mal'tseva A.N. Tendency of low-carbon pipe steel to the Bauschinger effect. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*. 2015, vol. 15, no. 2, pp. 26–32. (In Russ.).
35. Khadeev G.E. Effect of multistage deformation during the pipe manufacturing on mechanical properties of steels strength grade X70–X80. In: *Proceedings of the 8th Int. Conf. on Modeling and Simulation of Metallurgical Processes in Steelmaking (STEELSIM 2019)*. August 13–15, 2019, Toronto, Ont., Canada. 2019, pp. 347–357.
36. Kim H.L., Park S.H. Loading direction dependence of yield-point phenomenon and Bauschinger effect in API X70 steel sheet. *Metals and Materials International*. 2020, vol. 26, pp. 14–24. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00325-z>
37. Skripnyak V.A. Modeling of the Bauschinger effect based on dislocation kinetics of plastic deformation. In: *All-Union Seminar on Strain Hardening of Steels and Alloys*. Barnaul: ASU Publ., 1981, p. 54. (In Russ.).
38. Rychkov B.A. Complex deformation of steel 45. In: *On the Problem of Mechanics of a Real Solid*. Frunze: Izdatel'stvo Ilim, 1984, pp. 66–78. (In Russ.).
39. Feigin M. Inelastic behavior under the combined action of tension and torsion. In: *Mechanics: Translated Papers*. 1956, no. 3, pp. 125–139. (In Russ.).
40. Komartsov N.M., Luzhanskaya T.A., Rychkov B.A. The Bauschinger effect under complex loading. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2010, vol. 15, no. 3, pp. 853–855. (In Russ.).
41. Smirnov M.A., Pyshmintsev I.Yu., Varnak O.V., Mal'tseva A.N., Goikhenberg Yu.N. Strain aging and the Bauschinger effect in low-carbon pipe steel. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 1, pp. 58–64. <https://doi.org/10.3103/S0967091216010149>
42. Kostryzhev A.G., Strangwood M. Bauschinger Effect in Microalloyed Steels: Part I. Dependence on Dislocation-Particle Interaction. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2010, vol. 41, pp. 1399–1408. <https://doi.org/10.1007/s11661-010-0196-4>
43. Samusev S.V., Zhigulev G.P., Skripalenko M.M., Fadeev V.A. Research of technological parameters of billet stepwise forming in production of large diameter tubes at tube electric pipe welded line TESA 1420. *Chernye Metally*. 2017, no. 9, pp. 73–77.

44. Лоевец Д.А., Волегов П.С. Описание эффекта Баушингера при циклическом нагружении поликристаллов с использованием двухуровневой математической модели // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2016. Т. 21. № 3. С. 1116–1119.
45. Сергиев А.П., Проскурин А.А., Логачев В.Н. Влияние эффекта Баушингера на листовую вырубку // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 5. С. 82–85.
46. Хван А.Д., Хван Д.В., Воропаев А.А. Однообразцовый способ оценки эффекта Баушингера // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. Т. 86. № 7. С. 55–58.
<https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-55-58>
47. Харитонов В.А. Оценка эффективности изготовления стальной проволоки совмещенным способом «прокатка – волочение» // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. № 5. С. 15–19.
48. Шапиевская В.А. Экспериментальные методы определения параметров эффекта Баушингера // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2011. № 1. С. 3–8.
49. Sowerby R., Uko D.K., Tomita Y. A review of certain aspects of the Bauschinger effect in metals // Materials Science and Engineering. 1979. Vol. 41. No. 1. P. 43–58.
[https://doi.org/10.1016/0025-5416\(79\)90043-0](https://doi.org/10.1016/0025-5416(79)90043-0)
50. Moan G.D., Embury J.D. A study of the Bauschinger effect in Al–Cu alloys // Acta Metallurgica. 1979. Vol. 27. No. 5. P. 903–914.
[https://doi.org/10.1016/0001-6160\(79\)90125-1](https://doi.org/10.1016/0001-6160(79)90125-1)
51. Новожилов В.В. О сложном нагружении и перспективах феноменологического подхода к исследованию микронапряжений // Прикладная математика и механика. 1964. Т. 28. Вып. 3. С. 394–400.
52. Талыпов Г.Б. Пластичность и прочность стали при сложном нагружении. Ленинград: ЛГУ, 1968. 134 с.
44. Loevets D.A., Volegov P.S. Description of the Bauschinger effect under cyclic loading of polycrystals using a two-level mathematical model. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2016, vol. 21, no. 3, pp. 1116–1119. (In Russ.).
45. Sergiev A.P., Proskurin A.A., Logachev V.N. Influence of the Bauschinger effect on sheet cutting. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*. 2012, no. 5, pp. 82–85. (In Russ.).
46. Khvan A.D., Khvan D.V., Voropaev A.A. Single sample method for assessing the Bauschinger effect. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*. 2020, vol. 86, no. 7, pp. 55–58. (In Russ.).
<https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-55-58>
47. Kharitonov V.A. Evaluation of the efficiency of manufacturing steel wire by the combined “rolling – drawing” method. *Kuznechno-shampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2013, no 5, pp. 15–19. (In Russ.).
48. Shapievskaia V.A. Experimental methods for determining parameters of the Bauschinger effect. *Kuznechno-shampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2011, no. 1, pp. 3–8. (In Russ.).
49. Sowerby R., Uko D.K., Tomita Y. A review of certain aspects of the Bauschinger effect in metals. *Materials Science and Engineering*. 1979, vol. 41, no. 1, pp. 43–58.
[https://doi.org/10.1016/0025-5416\(79\)90043-0](https://doi.org/10.1016/0025-5416(79)90043-0)
50. Moan G.D., Embury J.D. A study of the Bauschinger effect in Al–Cu alloys. *Acta Metallurgica*. 1979, vol. 27, no. 5, pp. 903–914.
[https://doi.org/10.1016/0001-6160\(79\)90125-1](https://doi.org/10.1016/0001-6160(79)90125-1)
51. Novozhilov V.V. On complex loading and prospects of phenomenological approach to microstresses analysis. *Prikladnaya matematika i mekhanika*. 1964, vol. 28, no. 3, pp. 394–400. (In Russ.).
52. Talypov G.B. *Plasticity and Strength of Steel under Complex Loading*. Leningrad: LSU, 1968, 134 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Руслан Рафкатович Адигамов, к.т.н., начальник управления, АО «Северсталь Менеджмент»

E-mail: rradigamov@severstal.com

Владимир Александрович Андреев, к.т.н., старший научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; генеральный директор, ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ»

ORCID: 0000-0003-3937-1952

E-mail: andreev.icmateks@gmail.com

Станислав Олегович Рогачев, научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; к.т.н., доцент кафедры металловедения и физики прочности, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ORCID: 0000-0001-7769-7748

E-mail: csaap@mail.ru

Евгений Сергеевич Федотов, старший менеджер, АО «Северсталь Менеджмент»

E-mail: esfedotov@severstal.com

Григорий Евгеньевич Хадеев, к.т.н., ведущий эксперт, АО «Северсталь Менеджмент»

E-mail: ge.khadeev@severstal.com

Владимир Сабитович Юсупов, д.т.н., главный научный сотрудник, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН; профессор, МИРЭА – Российский технологический университет

ORCID: 0000-0002-0640-2217

E-mail: vsyusupov@mail.ru

Ruslan R. Adigamov, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department, JSC “Severstal Management”

E-mail: rradigamov@severstal.com

Vladimir A. Andreev, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences; General Director, Industrial Center MATEK-SMA, Ltd.

ORCID: 0000-0003-3937-1952

E-mail: andreev.icmateks@gmail.com

Stanislav O. Rogachev, Research Associate, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences; Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Metallography and Physics of Strength”, National University of Science and Technology “MISIS”

ORCID: 0000-0001-7769-7748

E-mail: csaap@mail.ru

Evgenii S. Fedotov, Senior Manager, JSC “Severstal Management”

E-mail: esfedotov@severstal.com

Grigori E. Khadeev, Cand. Sci. (Eng.), Leading Expert, JSC “Severstal Management”

E-mail: ge.khadeev@severstal.com

Vladimir S. Yusupov, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences; Prof., MIREA – Russian Technological University

ORCID: 0000-0002-0640-2217

E-mail: vsyusupov@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Р. Р. Адигамов – научное руководство.

В. А. Андреев – научное руководство, доработка текста.

С. О. Рогачев – формирование основной концепции, подготовка текста статьи.

Е. С. Федотов – научное руководство.

Г. Е. Хадеев – научное руководство, доработка текста, корректировка выводов.

В. С. Юсупов – формирование основной концепции, подготовка текста статьи, формулирование выводов.

R. R. Adigamov – scientific guidance.

V. A. Andreev – scientific guidance, defining the text.

S. O. Rogachev – formation of the main concept, writing the text.

E. S. Fedotov – scientific guidance.

G. E. Khadeev – scientific guidance, defining the text, correction of the conclusions.

V. S. Yusupov – formation of the main concept, writing the text, formation of the conclusions.

Поступила в редакцию 17.03.2022

После доработки 24.03.2022

Принята к публикации 25.04.2022

Received 17.03.2022

Revised 24.03.2022

Accepted 25.04.2022



Краткое сообщение

УДК 536.425:539.25:539.531:669.017

DOI 10.17073/0368-0797-2022-7-467-470

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2339>



СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЯ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫМ СПЛАВОМ FeCoCrNiAl

Ю. Ф. Иванов^{1,2}, В. Е. Громов², К. А. Осинцев^{2,3}

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3)

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

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

Аннотация. Покрытие высокоэнтروпийного сплава (ВЭС) неэквивалентного состава сформировано на подложке из сплава 5083 по технологии проволоочно-дугового аддитивного производства (WAAM) в атмосфере чистого азота. Методами современного физического материаловедения проведен анализ структуры, элементного состава, микротвердости, износостойкости системы покрытие/подложка.

Ключевые слова: высокоэнтропийный сплав, система покрытие/подложка, структура, износостойкость, микротвердость

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 20-19-00452 и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта по соглашению № 075-15-2021-709, уникальный идентификатор проекта RF-2296.61321X0037 (проведение контрольных измерений).

Для цитирования: Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Осинцев К.А. Структура и свойства покрытия высокоэнтропийным сплавом FeCoCrNiAl // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 7. С. 467–470. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-467-470>

Short report

STRUCTURE AND PROPERTIES OF HIGH-ENTROPY FeCoCrNiAl ALLOY COATING

Yu. F. Ivanov^{1,2}, V. E. Gromov², K. A. Osintsev^{2,3}

¹ Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

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

³ Samara National Research University (34 Moskovskoe Route, Samara 443086, Russian Federation)

Abstract. The coating of a high-entropy alloy (HEA) of non-equiatomic composition was formed on a substrate of alloy 5083 using the technology of wire-arc additive manufacturing (WAAM) in an atmosphere of pure nitrogen. Analysis of the structure, elemental composition, micro-hardness, and wear resistance of the coating/substrate system was carried out using the methods of modern physical materials science.

Keywords: high-entropy alloy, coating/substrate system, structure, wear resistance, microhardness

Funding: The research was supported by the grant of the Russian Science Foundation (project No. 20-19-00452) and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the project under agreement No. 075-15-2021-709, the unique identifier of the project RF-2296.61321X0037 (control measurements).

For citation: Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Osintsev K.A. Structure and properties of high-entropy FeCoCrNiAl alloy coating. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 7, pp. 467–470. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-467-470>

ВВЕДЕНИЕ

Одной из фундаментальных и практически ориентированных задач физики конденсированного состояния и физического материаловедения является разработка физических основ создания металлических материа-

лов, обладающих комплексом необходимых физико-механических и эксплуатационных свойств, а также технологий их получения. В последние годы внимание ученых привлекает новая система сплавов, известная как высокоэнтропийные (ВЭС) [1–3]. Оригинальные результаты, полученные в области ВЭС, подробно рас-

смотрены в аналитических обзорах [4 – 6], где описана микроструктура, свойства, термодинамика ВЭС, рассмотрены результаты моделирования их структуры и обсуждены новые варианты методов получения многокомпонентных сплавов. В настоящее время разрабатываются практически все типы таких сплавов (конструкционные, крио- и жаропрочные, коррозионноустойчивые, с особыми магнитными и электрическими свойствами), а также покрытия на их основе [7].

Целью настоящей работы является анализ структуры и свойств покрытия ВЭС, наплавленного на образцы сплава 5083.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала исследования были использованы образцы системы покрытие/подложка. Покрытием являлся высокоэнтропийный сплав неэквивалентного элементного состава FeCoCrNiAl (15,64 % Al, 7,78 % Co, 8,87 % Cr, 22,31 % Fe, 44,57 % Ni (по массе)), который был сформирован на подложке методом WAAM. Подложкой являлся сплав 5083. Методами сканирующей электронной микроскопии (приборы Leo EVO 50 и TESCAN VEGA, оснащенные энергодисперсионными анализаторами INCA Energy) исследовали структуру и элементный состав покрытия и прилегающего к нему слоя подложки. Свойства покрытия и подложки характеризовали микротвердостью (прибор HV-1000, нагрузка на индентор 0,5 Н) и износостойкостью (прибор TRIBOTester, параметры: нормальная нагрузка 2 Н; скорость вращения 25 мм/с; длина пути трения 100 м; радиус дорожки трения 2 мм; контртело – карбид вольфрама в форме шарика диаметром 6 мм; испытания путем сухого трения на воздухе при комнатной температуре).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования механических свойств покрытия выполнены путем построения профиля микротвердости. В объеме покрытия микротвердость изменяется в пределах 6,6 – 6,2 ГПа (рис. 1, область 1) и возрастает до 7,6 ГПа на границе с подложкой (рис. 1, область 2). Твердость подложки у границы с покрытием достигает 1,5 – 1,6 ГПа и снижается до 1,1 ГПа на расстоянии 5 мм от границы (рис. 1, область 3). Трибологические испытания, выполненные на продольном сечении покрытия (сечение параллельно границе раздела покрытие/подложка) в средней его части, показали, что параметр износа составляет $1,0 \cdot 10^{-5}$ (Н·м)/мм³, коэффициент трения покрытия – 0,24.

Исследование поперечного сечения покрытия выявило структуру, характерную для двухфазного материала, в котором в объеме основной фазы присутствуют включения второй фазы. Эти включения имеют округлую (глобулярную) форму и располагаются по

границам зерен основной фазы. Размеры включений второй фазы изменяются в пределах от 2 до 9 мкм.

Слой подложки, прилегающий к покрытию, имеет игольчатую (пластинчатую) структуру, что свидетельствует о легировании подложки химическими элементами покрытия с последующими фазовыми превращениями в подложке. Очевидно, это объясняет факт увеличения микротвердости данного слоя подложки.

Элементный состав системы покрытие/подложка изучали методами микрорентгеноспектрального анализа. На рис. 2 приведены результаты анализа элементного состава центральной части покрытия, которые свидетельствуют о наличии в покрытии формирующих ВЭС элементов, наносимых на подложку. Результаты количественного анализа элементного состава покрытия на различном расстоянии от поверхности (x) приведены ниже:

x, мкм	Содержание элемента, % (ат.)				
	Al	Cr	Fe	Co	Ni
100	30,9	11,5	21,9	6,5	29,2
350	30,8	12,3	23,1	6,2	27,6
600	34,8	5,8	15,1	6,1	38,2
900	35,1	7,5	17,5	6,2	33,7

По мере удаления от поверхности покрытия отмечается увеличение концентрации алюминия, которая может достигать примерно 90 % на участке слоя, прилегающего к границе раздела покрытие/подложка. Микрорентгеноспектральным анализом пограничного слоя контакта покрытия и подложки подтверждается факт легирования слоя покрытия толщиной примерно 100 мкм элементами подложки и незначительное проникновение элементов покрытия в подложку в усло-

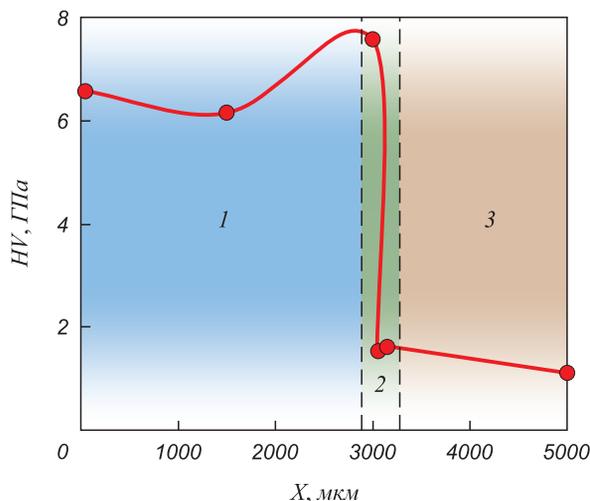


Рис. 1. Профиль микротвердости системы покрытие/подложка: 1 – область покрытия; 2 – переходный слой; 3 – область подложки

Fig. 1. Microhardness profile of the coating/substrate system: 1 – coating area; 2 – transition layer; 3 – substrate area

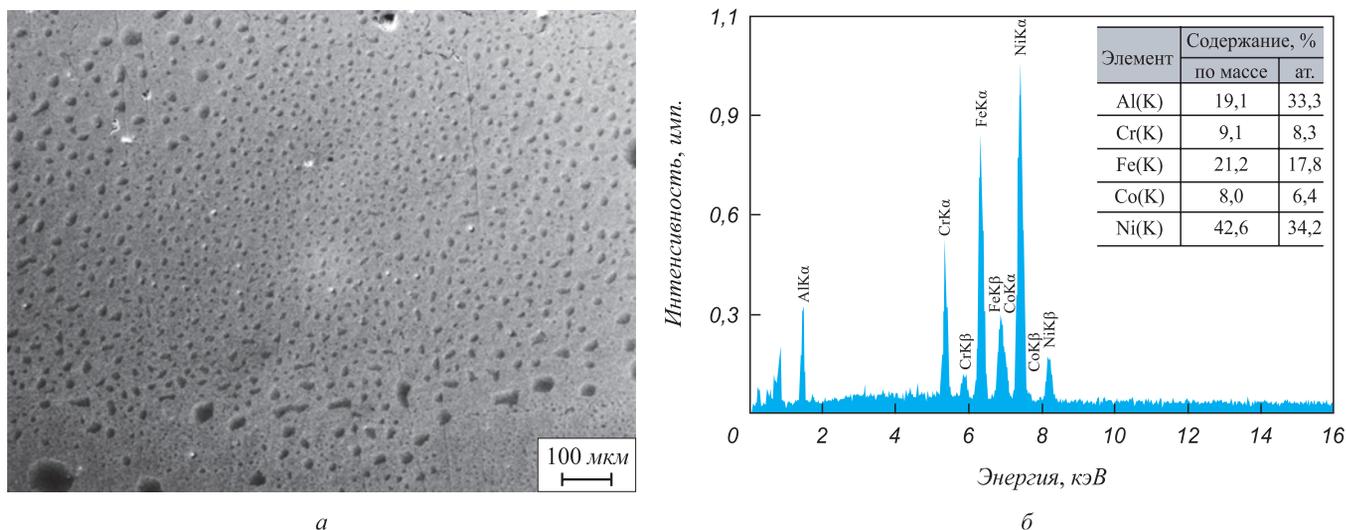


Рис. 2. Структура (а) и энергетические спектры (б), полученные с участка покрытия (а)

Fig. 2. Structure (a) and energy spectra (b) obtained from the coating area (a)

виях низкого уровня контакта подложки и покрытия. В этом случае игольчатая структура в подложке не наблюдается.

При сплавлении покрытия и подложки толщина легированного слоя подложки достигает 450 – 500 мкм. Легирующие элементы распределены по толщине подложки неравномерно. При этом выявляется некоторый квазипериодический характер распределения легирующих элементов, что обусловлено особенностями формирования системы покрытие/подложка.

Выводы

Методами сканирующей электронной микроскопии, путем определения микротвердости и износостойкости проведены исследования структуры, элементного состава, механических и трибологических свойств системы «покрытие (ВЭС)/(5083) подложка», сформиро-

ванной WAAM методом. Получены следующие основные результаты:

- нанесение ВЭС на поверхность сплава 5083 сопровождается формированием градиентной структуры, характеризующейся закономерным изменением микротвердости, элементного и, очевидно, фазового состава;
- выявлен ступенчатый характер изменения микротвердости системы «покрытие (ВЭС)/(5083) подложка»;
- выявлено легирование примыкающего к подложке слоя покрытия толщиной до 100 мкм элементами подложки;
- легирование подложки элементами покрытия сопровождается в слое толщиной до 500 мкм квазипериодическим изменением элементного состава сплава 5083;
- выявлено формирование в слое подложки, примыкающей к покрытию, игольчатой (пластинчатой) структуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Alshataif Y.A., Sivasankaran S., Al-Mufadi F.A., Alaboodi A.S., Ammar H.R. Manufacturing methods, microstructural and mechanical properties evolutions of high-entropy alloy: A review // *Metals and Materials International*. 2019. Vol. 26. P. 1099–1133. <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00565-z>
2. Cheng K.-C., Chen J.-H., Stadler S., Chen S.-H. Properties of atomized AlCoCrFeNi high-entropy alloy powders and their phase-adjustable coatings prepared via plasma spray process // *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 478. P. 478–486. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.203>
3. Joseph J., Hodgson P., Jarvis T., Wu X., Stanford N., Fabijanic D.M. Effect of hot isostatic pressing on the microstructure and mechanical properties of additive manufactured Al_xCoCrFeNi high entropy alloys // *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 733. P. 59–70. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.07.036>
4. 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>

5. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys // *Science China Materials*. 2018. Vol. 61. No. 1. P. 2–22. <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
6. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов // *Физика металлов и металловедение*. 2020. Т. 121. № 8. С. 807–841. <https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>
7. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. *Structure and Properties of High-Entropy Alloys*. Springer, *Advanced Structured Materials*, 2021. Vol. 107. 110 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8>
5. Zhang W., Liaw P.K., Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Science China Materials*. 2018, vol. 61, no. 1, pp. 2–22. <https://doi.org/10.1007/s40843-017-9195-8>
6. Rogachev A.S. Structure, stability, and properties of high-entropy alloys. *Physics of Metals and Metallography*. 2020, vol. 121, no. 8, pp. 733–764. <https://doi.org/10.31857/S0015323020080094>
7. Gromov V.E., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Osintsev K.A. *Structure and Properties of High-Entropy Alloys*. Springer, *Advanced Structured Materials*, 2021, vol. 107, 110 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78364-8>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., профессор, Сибирский государственный индустриальный университет; *главный научный сотрудник*, Институт сильноточной электроники СО РАН

ORCID: 0000-0001-8022-7958

E-mail: yufi55@mail.ru

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Кирилл Александрович Осинцев, аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-1150-6747

E-mail: kirilloss@yandex.ru

Yurii F. Ivanov, *Dr. Sci. (Phys.-Math.)*, Prof., Siberian State Industrial University; *Chief Researcher*, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0001-8022-7958

E-mail: yufi55@mail.ru

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

ORCID: 0000-0002-5147-5343

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

Kirill A. Osintsev, *Postgraduate of the Chair of Metals Technology and Aviation Materials*, Samara National Research University, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-1150-6747

E-mail: kirilloss@yandex.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Ю. Ф. Иванов – электронно-микроскопические исследования поверхности разрушения ВЭС, обсуждение результатов.

В. Е. Громов – выработка концепции работы, подготовка окончательного варианта статьи.

К. А. Осинцев – проведение трибологических испытаний, обзор литературы, обсуждение результатов.

Yu. F. Ivanov – electron microscopic studies of destruction surface of wind turbines, discussion of the results.

V. E. Gromov – development of the work concept, preparation of the article final version.

K. A. Osintsev – conducting tribological tests, literature review, discussion of the results.

Поступила в редакцию 06.05.2022

После доработки 12.05.2022

Принята к публикации 26.05.2022

Received 06.05.2022

Revised 12.05.2022

Accepted 26.05.2022



Оригинальная статья

УДК 622.7:622.348.1

DOI 10.17073/0368-0797-2022-7-471-478

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2340>

ТЕРМИЧЕСКОЕ ОБОГАЩЕНИЕ НИКЕЛЯ ИЗ ЛИМОНИТА МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Ф. Бахфи^{1,2}, А. Манаф², В. Астути¹, Ф. Нурджаман¹,
Э. Прасетио^{1,3}, С. Сумарди¹

¹ Научно-исследовательский центр горных технологий, Национальное агентство исследований и инноваций Индонезии (Индонезия, 35361, Лампунг, Южный Лампунг)

² Университет Индонезии (Индонезия, 16424, Западная Ява, Депок, Беджи)

³ Норвежский университет науки и технологии (Норвегия, Тронхейм, Глосхауген, N-7491, Кьеми, 4)

Аннотация. Для изучения минералогического состава и параметров лимонитовых руд из Индонезии применялись методы рентгеновской дифракции (XRD), рентгеновской флуоресценции (XRF), энергодисперсионного микроанализа на растровом электронном микроскопе (SEM–EDS) и дифференциального термического анализа (DTA). Полученные данные указывают на наличие сложного внутреннего ядра в латеритной руде. Содержание Ni, Fe, Mg, Al и Si в лимоните составляет 1,4; 50,5; 1,81; 4,86 и 16,5 % (вес.) соответственно, оксидов/гидроксидов железа – 94,4 %, силикатов – 5,6 %. Термический анализ показывает, что при низкой температуре (200 – 300 °С) в лимоните происходит фазовый переход, при этом гетит замещается гематитом. Эта фаза является оптимальным вариантом для диффузии никеля в железо. Более того, для данного лимонита в качестве подходящего метода было выбрано термическое обогащение.

Ключевые слова: характеристика, лимонит, фаза, микроструктура, термическая гравиметрия, термическое обогащение

Финансирование: Благодарим за финансовую поддержку Министерство образования, культуры, исследований и технологии – Директорат высшего образования, исследований и технологии в рамках исследовательского проекта PDD 2022 и контракта № NKB-968/UN2.RST/HKP.05.00/2022.

Благодарности: Авторы выражают благодарность Университету материаловедения Индонезии и Исследовательскому центру по технологии добычи – Национальному исследовательско-инновационному агентству Индонезии за предоставление объектов исследования.

Для цитирования: Бахфи Ф., Манаф А., Астути В., Нурджаман Ф., Прасетио Э., Сумарди С. Термическое обогащение никеля из лимонита методом селективного восстановления // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 7. С. 471–478.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-471-478>

Original article

THERMAL UPGRADING OF NICKEL FROM LIMONITE BY MEANS OF SELECTIVE REDUCTION

F. Bahfie^{1,2}, A. Manaf², W. Astuti¹, F. Nurjaman¹,
E. Prasetyo^{1,3}, S. Sumardi¹

¹ Research Center of Mining Technology, National Research and Innovation Agency of Indonesia (Jalan Ir. Sutami Km. 15, South Lampung, Lampung 35361, Indonesia)

² University of Indonesia (Pondok Cina, Beji, Depok City, West Java 16424, Indonesia)

³ Norwegian University of Science and Technology (4 Kjemi Gløshaugen, Trondheim 7491, Norway)

Abstract. X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), scanning electron microscopy energy dispersion spectroscopy (SEM–EDS), and differential thermal analysis (DTA) measurements were used to investigate the mineralogical characteristics and distribution of data set in limonite soil from Indonesia. The findings point to a complicated inner core in laterite ore. Ni, Fe, Mg, Al, and Si levels in limonite are 1.4, 50.5, 1.81, 4.86 and 16.5 wt %, respectively. The iron oxide/oxyhydroxide content of limonite is 94.4 and 5.6 % silicate. DTA shows that limonite has a phase transition in the low temperature (200 – 300 °C) with the goethite transformation to hematite. This phase is good optimization for nickel diffusion in the iron. Moreover, for this limonite, the thermal upgrading was used as a good method.

Keywords: characterization, limonite, phase, microstructure, thermal gravimetry, thermal upgrading

Funding: The work was supported by the Ministry of Education, Culture, Research, and Technology–Directorate of Higher Education, Research, and Technology under research project PDD 2022 and contract No. NKB-968/UN2.RST/HKP.05.00/2022.

Acknowledgements: The authors express their gratitude to the Materials Science University of Indonesia and the Research Center of Mining Technology – National Research and Innovation Agency of Indonesia for support and research facilities.

For citation: Bahfie F., Manaf A., Astuti W., Nurjaman F., Prasetyo E., Sumardi S. Thermal upgrading of nickel from limonite by means of selective reduction. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 7, pp. 471–478. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-471-478>

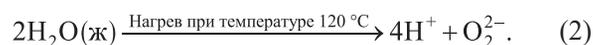
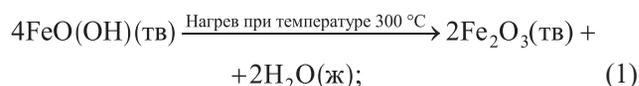
ВВЕДЕНИЕ

Учитывая, что никелевые латериты содержат 60 – 70 % мировых ресурсов никеля, а их добыча ведется уже около 140 лет, до 2000 г. они обеспечивали менее 40 % объема мирового производства никеля, а остальная часть приходилась на сульфидные руды [1, 2]. Со снижением доли разведанных месторождений сульфидных никелевых руд объемы разведки и добычи латеритных никелевых руд возросли [1]. Латеритные никелевые ресурсы обладают рядом преимуществ, включая богатые запасы, низкие инвестиционные расходы, простую транспортировку и широкий ассортимент продукции, включая ферроникель, никелевый штейн и оксид никеля [1]. В зависимости от химических и физических свойств, латеритные месторождения никеля делятся на две категории: сапролитовые и лимонитовые руды [3]. Лимонитовые руды содержат гетит, гиббсит и хромит и подстилаются кристобалитом и протоэнстатитом [4 – 8]. Тем не менее, из-за их слабой кристаллизации и крошечного размера частиц механические процедуры обогащения для таких никелевых латеритов неэффективны. Потому использование физических методов для надлежащего обогащения данных руд обычно затруднено. Для извлечения никеля из латеритных руд используются пирометаллургические методы, которые позволяют достигать значительного извлечения никеля [9 – 22]. Кроме того, сложный минеральный состав латерита оказывает существенное влияние на процесс восстановительного обжига, вследствие чего знание дезинтеграции латерита имеет решающее значение для его предварительного восстановления [13]. Поскольку никель содержится в гетите и силикатах, для растворения силикатных и никелевых соединений требуется использовать реагенты. Обычно для этих целей применяют растворитель [13 – 15, 19 – 21]. В рамках данного исследования будут изучены свойства сапролита, содержащегося в материале, с целью определения оптимального процесса его извлечения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Лимонитовая руда добывается в Торобулу, Юго-Восточный Сулавеси, Индонезия. На первом этапе выполнялось ситование лимонита на сотрясательном сите до крупности 100 меш, которая является оптимальной для латерита. Для проведения эксперимента и испытания методом термического анализа отбирались навески по 10 и 1 г. Испытание заключалось в отжиге при температуре 150 и 300 °С в течение 1 ч в печи с

давлением воздуха 1 атм. Термический анализ с использованием Linseis-PT1600 состоял в отжиге при температуре от 200 до 1200 °С с шагом 10 °С/мин и давлением воздуха 1 атм. Анализ данных проводился с использованием Origin 8.1, затем на настольном спектрометре PANalytical Epsilon 3XLE выполнялся анализ методом рентгеновской флуоресценции (на пробе концентрата после магнитной сепарации и сушки крупностью 200 меш сразу после гомогенизации в шаровой мельнице в течение 8 ч). Данные анализировались в Microsoft Excel 2016. Рентгеновская дифракция выполнялась в дифрактометре PANalytical X'Pert3 (на пробе крупностью 200 меш, 2θ в диапазоне 10 – 80° с шагом 0,05), анализ данных проводился в High Score Plus. Для энергодисперсионного микроанализа на растровом электронном микроскопе использовался микроскоп Thermo-scientific Quatro 6 с увеличением 5000, для выполнения энергодисперсионного микроанализа применялся анализатор Bruker. Химическая реакция дигидроксилирования гетита представлена в уравнении (1), испарения воды – в (2). После характеристического испытания проба смешивалась с восстановителем и реагентом (ступени 1 и 2). Степень 1 выполняется без выдержки температуры с переходом прямо к восстановлению при температуре 1150 °С. Степень 2 осуществляется с поддержанием температуры на уровне 300 °С с переходом прямо к восстановлению при температуре 1150 °С.



АНАЛИЗ ИСХОДНОГО МАТЕРИАЛА

Как следует из табл. 1, удельный химический состав сапролитовой руды составляет, % (вес.): 1,4 Ni; 50,5 Fe; 1,81 Mg. На рис. 1 видно, что сапролитовая руда содержит гетит (FeHO₂) и кварц (SiO₂). В лимонитовой руде все компоненты являются оксидами и имеют минера-

Таблица 1

Химический состав лимонитовой руды, % (вес)

Table 1. The chemical composition of limonite ore

Ni	Fe	Si	Mg	Al	Ca	Cr	Mn	Co
1,4	50,5	16,5	1,81	4,86	0,177	2,68	0,847	0,0662

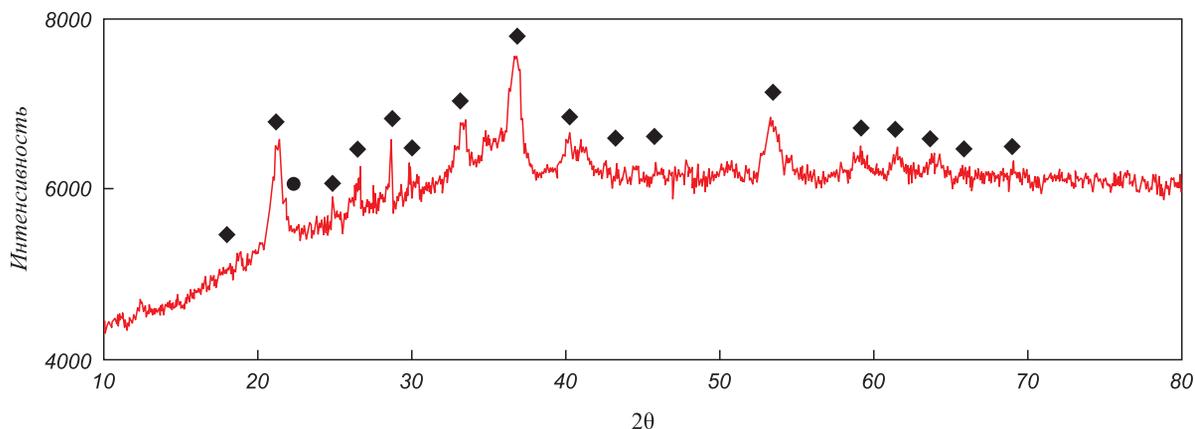


Рис. 1. Анализ лимонита методом рентгеновской дифракции:

◆ – гетит; ● – кварц

Fig. 1. XRD analysis of limonite:

◆ – goethite and ● – quartz

лоидную структуру. Никель в структуре гетита представлен в основном в виде оксида никеля и ассоциирует с железом. В результате расчетов методом Ритвельда получены данные, аналогичные полученным методом рентгеновской дифракции (табл. 2). Испытания пока-

зали, что исходный материал представляет собой лимонитовую руду. На рис. 2 и область 4 описывает испарение воды, область 5 – дигидроксилирование гетита.

Термогравиметрия и фазовый анализ лимонита с крутопадающими кривыми при каждой температуре (120 и 300 °С), представленными на рис. 2 и 4, показывают изменение в фазах гетита и испарение воды. Результат эксперимента объясняет переход фаз в лимоните. Морфология лимонита показана на рис. 3. Результат убедительно показывает, что основными элементами в лимоните являются оксиды железа, магния и кремния, а также никель, тесно ассоциирующий с железом.

Таблица 2

Расчеты лимонитовой руды методом Ритвельда

Table 2. Rietveld refinement calculations of limonite ore

Соединение	Всего, %
Гетит	94,4
Кварц	5,6

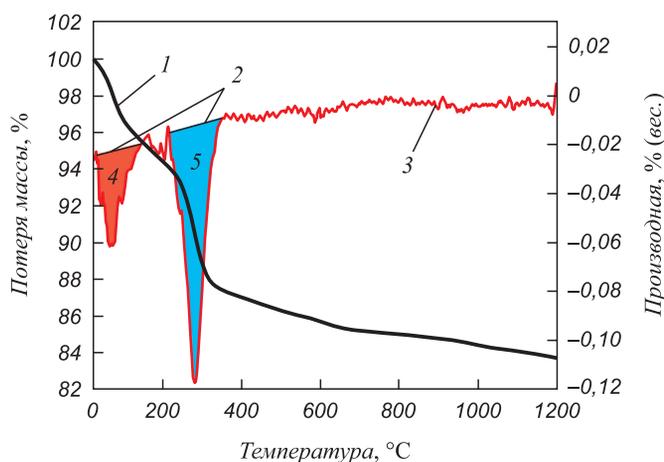


Рис. 2. Анализ методом производной термогравиметрии лимонита:

1 – лимонит; 2 – термогравиметрия; 3 – производная термогравиметрии; 4 – испарение воды; 5 – дигидроксилирование гетита

Fig. 2. DTG analysis of limonite:

1 – limonite; 2 – TG; 3 – DTG; 4 – water evaporation; 5 – dihydroxylation of goethite

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Влияние изменения температуры на фазовый переход

Изучение исходного материала показало, что фазовый переход происходит при температуре 120 и 300 °С, при этом при температуре 120 °С сохраняются те же фазы, что и в исходном материале, что свидетельствует о надлежащем испарении воды. При такой температуре данный процесс должен происходить и для лимонита. С другой стороны, при температуре 300 °С происходит

Таблица 3

Расчет изменения температуры в зависимости от процентного содержания фаз методом Ритвельда
Table 3. Rietveld refinement of calculation of the temperature variation

Общее содержание, %			Температура, °С
гетит	гематит	кварц	
94,4	0	5,6	120
0	94,4	5,6	300

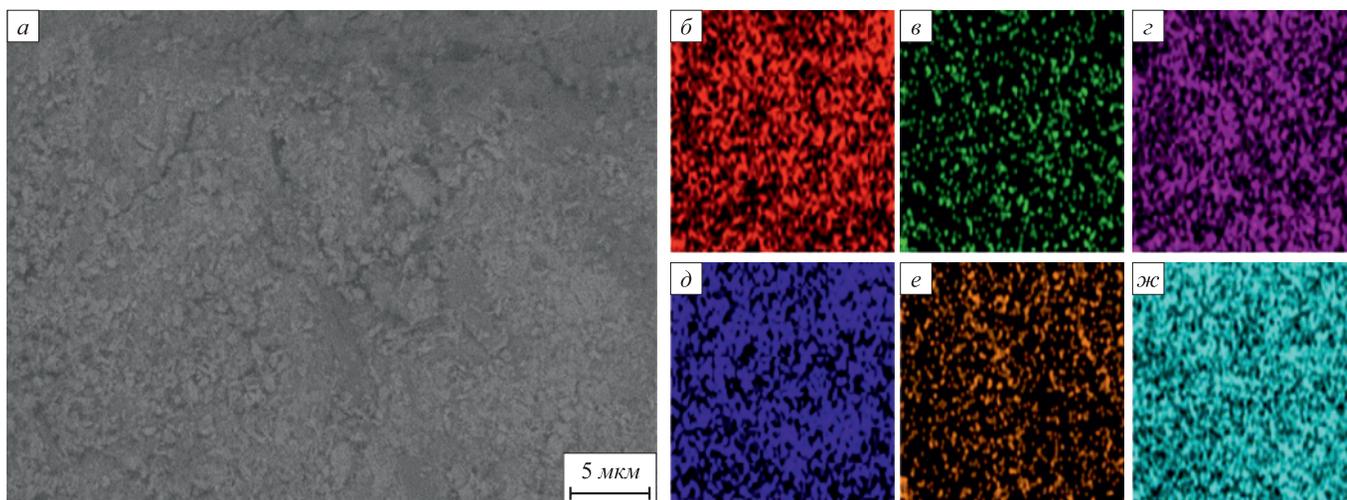


Рис. 3. Снимок энергодисперсионного микроанализа на растровом электронном микроскопе лимонита с увеличением 5000 (а): б – магний; в – алюминий; з – железо; д – кремний; е – никель; ж – оксид

Fig. 3. SEM EDS raw limonite with area mode magnification 5000× (а): б – magnesium; в – aluminum; з – iron; д – silica; е – nickel; ж – oxide

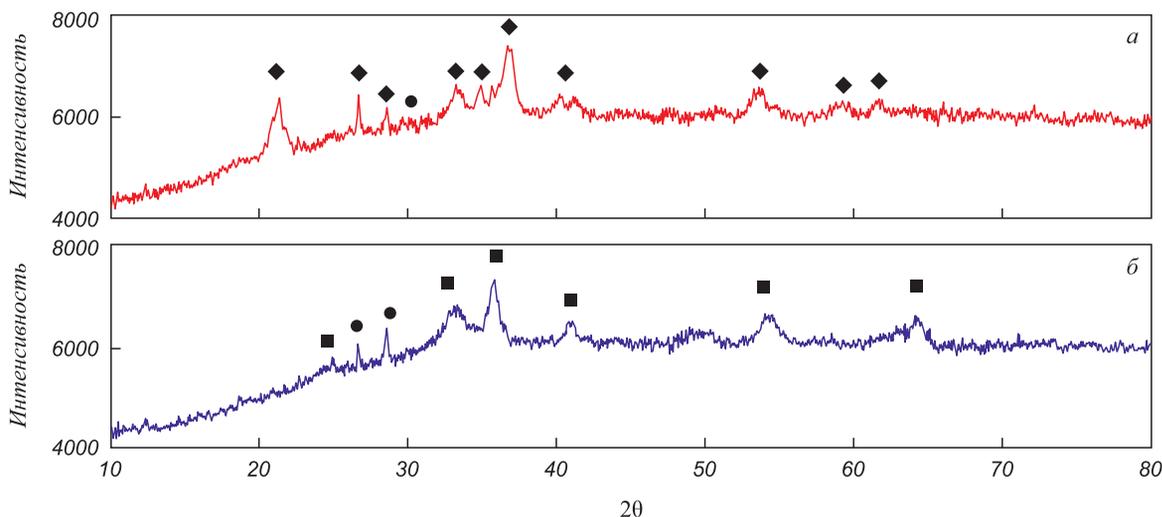


Рис. 4. График данных рентгеновской дифракции при температуре 120 °С (а) и 300 °С (б):

■ – гематит; ◆ – гетит; ● – кварц

Fig. 4. XRD pattern of 120 °C (а) and 300 °C (б):

■ – hematite; ◆ – goethite; ● – quartz

фазовый переход прямо из гетита в гематит, а кварц остается в таком же состоянии, как и в исходной руде. Из табл. 3 видно, что процентное содержание гетита резко падает до нуля. Как показывает рис. 2, при температуре 300 °С структура ОН меняется на окисленную, а результаты производной термогравиметрии также убедительно свидетельствуют о переходе гетита в гематит с существенной потерей массы.

Влияние изменения температуры на морфологию

Нагревание при температуре 120 °С приводит к разделению железа и никеля по сравнению с состоянием,

которое показано на рис. 3, и сопоставимо с показанным на рис. 5. Это происходит, когда испарение воды оказывает первоначальный эффект на фазовый переход. С другой стороны, магний, алюминий и кремний тесно связаны друг с другом. Структура может меняться на исходном этапе даже несмотря на то, что результат рентгеновской дифракции не показывает фазовый переход.

Нагревание при температуре 300 °С приводит к более тесной связи железа и никеля, о чем свидетельствует распределение элементов на рис. 6. Таким образом, 300 °С – это оптимальная температура для изменения фазы гетита на гематит. Объединение и переход магния, алюминия и кремния приводят к долж-

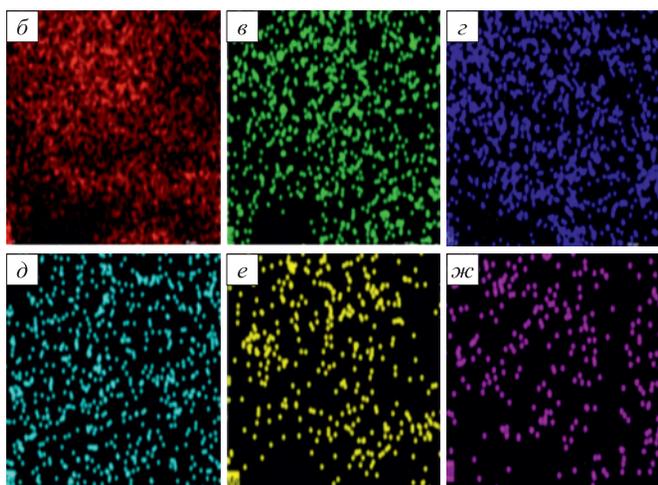
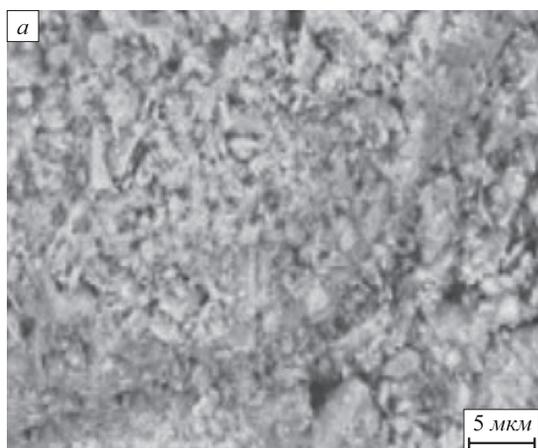


Рис. 5. Снимок энергодисперсионного микроанализа на растровом электронном микроскопе лимонита при температуре 120 °С с увеличением 5000 (а): б – оксид; в – алюминий; з – кремний; д – железо; е – магний; жс – никель

Fig. 5. SEM EDS limonite at 120 °C with area mode magnification 5000× (а): б – oxide; в – aluminium; з – silica; д – iron; е – magnesium; жс – nickel

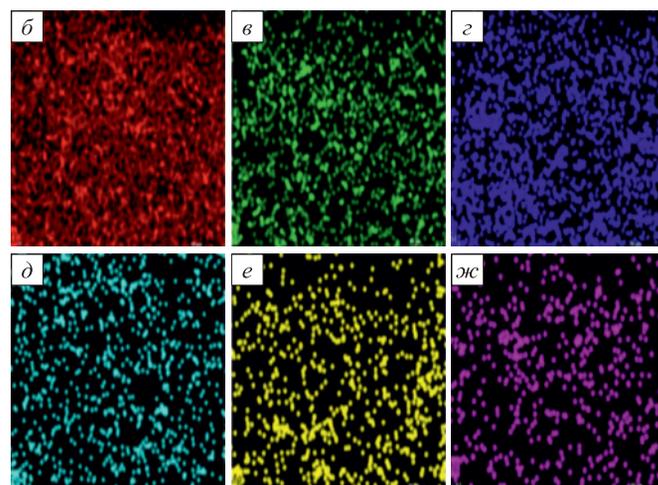
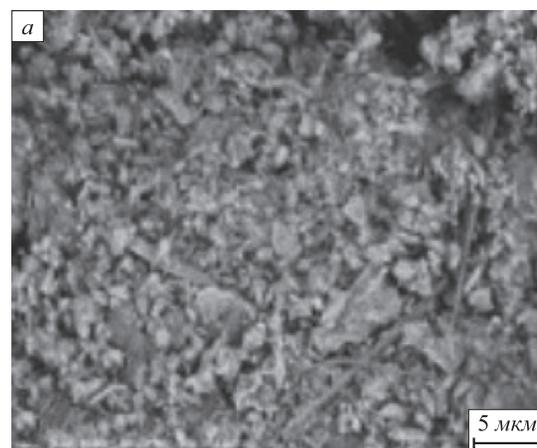


Рис. 6. Снимок энергодисперсионного микроанализа на растровом электронном микроскопе лимонита при температуре 300 °С с увеличением 5000 (а): б – оксид; в – алюминий; з – кремний; д – железо; е – магний; жс – никель

Fig. 6. SEM EDS limonite at 300 °C with area mode magnification 5000× (а): б – oxide; в – aluminium; з – silica; д – iron; е – magnesium; жс – nickel

ному фазовому переходу гетита в гематит. На этом этапе может меняться структура, а результат рентгеновской дифракции убедительно свидетельствует о фазовом переходе.

Влияние термического обогащения на фазовый переход, содержание никеля и микроструктуру

Термическое обогащение сильно влияет на фазовый переход. Ступень 2 на рис. 7 представляет оптимальное условие с высоким процентным содержанием никеля, при котором содержание никеля и железа равняется 6,079 и 67,893 % (вес.) соответственно. При увеличении температуры и с течением времени насыщение никелем увеличивается. На рис. 8 показано образование вюститита в зависимости от содержания железа при

температуре 250 – 350 °С. Железоникелевая фаза в ступени 2 более явная, чем в другой ступени. Средний гранулометрический состав составляет 10 – 15 мкм.

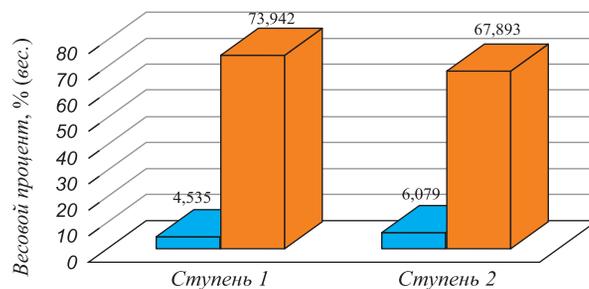


Рис. 7. Процентное содержание никеля (■) и железа (■) после термического обогащения лимонита

Fig. 7. The nickel (■) and iron (■) percentage after thermal upgrading of limonite

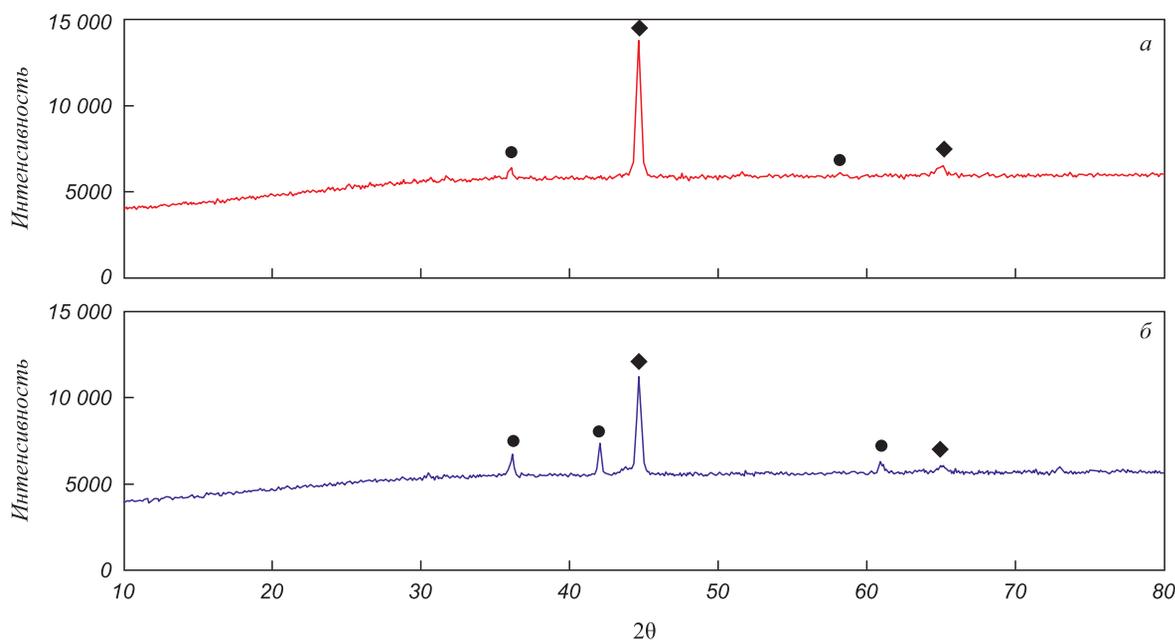


Рис. 8. Селективное восстановление лимонита, фазы ступени 1 (а) и ступени 2 (б):

● – вюстит; ◆ – железо/никель

Fig. 8. The phases of step 1 (a) and step 2 (b) selective reduction of limonite:

● – wustite; ◆ – iron/nickel

При этом при мелкой крупности процентное содержание железа и никеля оптимально. Термическое обогащение при низкой температуре имеет существенное влияние, увеличивая процентное содержание никеля до 6 % (вес.), что приводит к дигидроксилированию гетита.

Выводы

Результаты показывают, что оптимальный переход гетита в гематит происходит при температуре 300 °С. Изменение фаз приводит к насыщению гетитовой фазы

и замещению гематитом. Эксперимент по термическому обогащению (ступень 2 при температуре 300 °С) перед процессом восстановления показал оптимальное процентное содержание и извлечение никеля. Термическое обогащение при низкой температуре имеет существенное влияние, увеличивая процентное содержание никеля до 6 % (вес.), что приводит к дигидроксилированию гетита. В последующих исследованиях такая характеристика может послужить основой для дальнейшего селективного восстановления. Применение данного процесса перед восстановлением обеспечит оптимальное процентное содержание и извлечение никеля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- Butt C.R.M., Cluzel D. Nickel laterite ore deposits: Weathered serpentinites // *Elements*. 2013. Vol. 9. No. 2. P. 123–128. <https://doi.org/10.2113/gselements.9.2.123>
- Pickles C. A. Microwave heating behaviour of nickeliferous limonitic laterite ores // *Mineral Engineering*. 2004. Vol. 17. No. 6. P. 775–784. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.01.007>
- Kyle J. Nickel laterite processing technologies – where to next? In: *ALTA 2010 Nickel/Cobalt/Copper Conference*, 24–27 May, Perth, Western Australia. P. 1–36.
- Rao M., Li G., Jiang T., Luo J., Zhang Y., Fan X. Carbothermic reduction of nickeliferous laterite ores for nickel pig iron production in China: A review // *JOM*. 2013. Vol. 65. No. 11. P. 1573–1583. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0760-7>
- Rodrigues F., Pickles C., Peacey J., Elliott R., Forster J. Factors affecting the upgrading of a nickeliferous limonitic laterite ore by reduction roasting, thermal growth and magnetic separation // *Minerals*. 2017. Vol. 7. No. 12. Article 176. <https://doi.org/10.3390/min7090176>
- Soler J.M., Cama J., Gali S., Melendez W., Ramirez A., Estanga J. Composition and dissolution kinetics of garnierite from the Loma

- de Hierro Ni-laterite deposit, Venezuela // *Chemical Geology*. 2008. Vol. 249. No. 1–2. P. 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.12.012>
7. Xiong Y. Research on process mineralogy for the reverberatory furnace slag in Yunnan // *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*. 2015. Vol. 1. No. 2. P. 51–57. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6532.2015.01.012>
 8. Yongue-Fouateu R., Ghogomu R.T., Penaye J., Ekodeck G.E., Stendal H., Colin F. Nickel and cobalt distribution in the laterites of the Lomie region, south-east Cameroon // *Journal of African Earth Sciences*. 2006. Vol. 45. No. 1. P. 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2006.01.003>
 9. Li G., Jia H., Luo J., Peng Z., Zhang Y., Jiang T. Ferronickel preparation from nickeliferous laterite by rotary kiln-electric furnace process // *Characterization of Minerals, Metals, and Materials* 2016. P. 143–150. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48210-1_17
 10. Zhou S., Wei Y., Li B., Wang H., Ma B., Wang C., Luo X. Mineralogical characterization and design of a treatment process for Yunnan nickel laterite ore, China // *International Journal of Minerals Processing*. 2017. Vol. 159. P. 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.01.002>
 11. Zhou Y., Zhang C., Xie T., Hong T., Zhu H. A microwave thermostatic reactor for processing liquid materials based on a heat-exchanger // *Materials*. 2017. Vol. 10. No. 10. Article 1160. <https://doi.org/10.3390/ma10101160>
 12. Udy M.J., Udy M.C. Selective smelting of lateritic ores // *JOM*. 1959. Vol. 11. P. 311–314. <https://doi.org/10.1007/BF03397826>
 13. Yang S., Du W., Shi P., Shangguan J., Liu S., Zhou C., Chen P., Zhan Q., Fan H. Mechanistic and kinetic analysis of Na₂SO₄-modified laterite decomposition by thermogravimetry coupled with mass spectrometry // *PLoS ONE*. 2016. Vol. 11. No. 6. Article e0157369. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157369>
 14. Zhou S., Li B., Wei Y., Wang H., Wang C., Ma B. Effect of Additives on phase transformation of nickel laterite ore during low-temperature reduction roasting process using carbon monoxide. In: *Drying, Roasting, and Calcining of Minerals*. Thomas P.B., etc. eds. 2015. P. 177–184.
 15. Bahfie F, Manaf A, Astuti W, Nurjaman F. Tinjauan teknologi proses ekstraksi bijih nikel laterit // *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*. 2020. Vol. 17. No. 3. P. 135–152.
 16. Nurjaman F., Saekhan K., Bahfie F., Astuti W., Suharno B. Effect of binary basicity (CaO/SiO₂) on selective reduction of lateritic nickel ore // *Periodico di Mineralogia*. 2021. Vol. 90. No. 2. P. 239–245.
 17. Nurjaman F., Sari Y., Manurung P., Handoko A.S., Bahfie F., Astuti W., Suharno B. Study of binary, ternary, and quaternary basicity in reduction of saprolitic nickel ore // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2021. Vol. 74. No. 12. P. 3249–3263. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02391-7>
 18. Nurjaman F., Handoko A.S., Bahfie F., Astuti W., Suharno B. Effect of modified basicity in selective reduction process of limonitic nickel ore // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 15. P. 6476–6490. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.052>
 19. Bahfie F, Manaf A, Astuti W, Nurjaman F. Studies on reduction characteristics of limonite and effect of sodium sulphate on the selective reduction to nickel // *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. 2020. Vol. 102. No. 1. P. 149–157. <https://doi.org/10.1007/s40033-020-00240-3>
 20. Bahfie F, Manaf A, Astuti W, Nurjaman F, Prasetyo E, Sumardi S. Study effect of Na₂SO₄ dosage and graphite on the selective reduction of saprolite from nickel grade, recovery, and iron-nickel grain size // *AIP Conference Proceedings*. 2021. Vol. 2382. No. 1. Article 050007. <https://doi.org/10.1063/5.0060016>
 21. Bahfie F, Manaf A, Astuti W, Nurjaman F, Prasetyo E. Studies of carbon percentage variation and mixing Saprolite-Limonite in selective reduction // *Materials Today: Proceedings*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.679>
 22. Bahfie F, Shofi A., Herlina U., Handoko A.S., Septiana N.A., Syafridi S., Suharto S., Sudibyo S., Suhartono S., Nurjaman F. The effect of sulfur, temperature, the duration of the process and reductant de Hierro Ni-laterite deposit, Venezuela. *Chemical Geology*. 2008, vol. 249, no. 1–2, pp. 191–202. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.12.012>
 7. Xiong Y. Research on process mineralogy for the reverberatory furnace slag in Yunnan. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*. 2015, vol. 1, no. 2, pp. 51–57. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-6532.2015.01.012>
 8. Yongue-Fouateu R., Ghogomu R.T., Penaye J., Ekodeck G.E., Stendal H., Colin F. Nickel and cobalt distribution in the laterites of the Lomie region, south-east Cameroon. *Journal of African Earth Sciences*. 2006, vol. 45, no. 1, pp. 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2006.01.003>
 9. Li G., Jia H., Luo J., Peng Z., Zhang Y., Jiang T. Ferronickel preparation from nickeliferous laterite by rotary kiln-electric furnace process. In: *Characterization of Minerals, Metals, and Materials* 2016, pp. 143–150. https://doi.org/10.1007/978-3-319-48210-1_17
 10. Zhou S., Wei Y., Li B., Wang H., Ma B., Wang C., Luo X. Mineralogical characterization and design of a treatment process for Yunnan nickel laterite ore, China. *International Journal of Minerals Processing*. 2017, vol. 159, pp. 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.01.002>
 11. Zhou Y., Zhang C., Xie T., Hong T., Zhu H. A microwave thermostatic reactor for processing liquid materials based on a heat-exchanger. *Materials*. 2017, vol. 10, no. 10, article 1160. <https://doi.org/10.3390/ma10101160>
 12. Udy M.J., Udy M.C. Selective smelting of lateritic ores. *JOM*. 1959, vol. 11, pp. 311–314. <https://doi.org/10.1007/BF03397826>
 13. Yang S., Du W., Shi P., Shangguan J., Liu S., Zhou C., Chen P., Zhan Q., Fan H. Mechanistic and kinetic analysis of Na₂SO₄-modified laterite decomposition by thermogravimetry coupled with mass spectrometry. *PLoS ONE*. 2016, vol. 11, no. 6, article e0157369. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157369>
 14. Zhou S., Li B., Wei Y., Wang H., Wang C., Ma B. Effect of Additives on phase transformation of nickel laterite ore during low-temperature reduction roasting process using carbon monoxide. In: *Drying, Roasting, and Calcining of Minerals*. Thomas P.B., etc. eds. 2015, pp. 177–184.
 15. Bahfie F, Manaf A, Astuti W, Nurjaman F. Tinjauan teknologi proses ekstraksi bijih nikel laterit. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*. 2020, vol. 17, no. 3, pp. 135–152. (In Indonesian).
 16. Nurjaman F., Saekhan K., Bahfie F., Astuti W., Suharno B. Effect of binary basicity (CaO/SiO₂) on selective reduction of lateritic nickel ore. *Periodico di Mineralogia*. 2021, vol. 90, no. 2, pp. 239–245.
 17. Nurjaman F., Sari Y., Manurung P., Handoko A.S., Bahfie F., Astuti W., Suharno B. Study of binary, ternary, and quaternary basicity in reduction of saprolitic nickel ore. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2021, vol. 74, no. 12, pp. 3249–3263. <https://doi.org/10.1007/s12666-021-02391-7>
 18. Nurjaman F., Handoko A.S., Bahfie F., Astuti W., Suharno B. Effect of modified basicity in selective reduction process of limonitic nickel ore. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021, vol. 15, pp. 6476–6490. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.052>
 19. Bahfie F, Manaf A, Astuti W, Nurjaman F. Studies on reduction characteristics of limonite and effect of sodium sulphate on the selective reduction to nickel. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. 2020, vol. 102, no. 1, pp. 149–157. <https://doi.org/10.1007/s40033-020-00240-3>
 20. Bahfie F, Manaf A, Astuti W, Nurjaman F, Prasetyo E, Sumardi S. Study effect of Na₂SO₄ dosage and graphite on the selective reduction of saprolite from nickel grade, recovery, and iron-nickel grain size. *AIP Conference Proceedings*. 2021, vol. 2382, no. 1, article 050007. <https://doi.org/10.1063/5.0060016>
 21. Bahfie F, Manaf A, Astuti W, Nurjaman F, Prasetyo E. Studies of carbon percentage variation and mixing Saprolite-Limonite in selective reduction. *Materials Today: Proceedings*. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.679>
 22. Bahfie F, Shofi A., Herlina U., Handoko A.S., Septiana N.A., Syafridi S., Suharto S., Sudibyo S., Suhartono S., Nurjaman F. The effect of sulfur, temperature, the duration of the process and reductant

on the selective reduction of limonite ore // *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*. 2022. Vol. 38. No. 1. P. 123–136. <https://doi.org/10.24425/gsm.2022.140606>

tant on the selective reduction of limonite ore. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management*. 2022, vol. 38, no. 1, pp. 123–136. <https://doi.org/10.24425/gsm.2022.140606>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Фатхан Бахфи, научный сотрудник, Научно-исследовательский центр горных технологий, Национальное агентство исследований и инноваций Индонезии; аспирант, Университет Индонезии
ORCID: 0000-0003-3460-469X
E-mail: fathanbahfie@gmail.com

Fathan Bahfie, Researcher, Research Center of Mining Technology, National Research and Innovation Agency of Indonesia; Postgraduate, University of Indonesia
ORCID: 0000-0003-3460-469X
E-mail: fathanbahfie@gmail.com

Азвар Манаф, д.н., профессор кафедры физики, факультет математики и естественных наук, Университет Индонезии
ORCID: 0000-0002-6142-3918
E-mail: azwar@ui.ac.id

Azwar Manaf, Dr., Prof. of the Chair of Physics, Faculty of Mathematics and Science, University of Indonesia
ORCID: 0000-0002-6142-3918
E-mail: azwar@ui.ac.id

Види Астуту, д.т.н., научный сотрудник, Научно-исследовательский центр горных технологий, Национальное агентство исследований и инноваций Индонезии
ORCID: 0000-0001-9364-4291
E-mail: widi.mineral@gmail.com

Widi Astuti, Dr. Eng, Researcher, Research Center of Mining Technology, National Research and Innovation Agency of Indonesia
ORCID: 0000-0001-9364-4291
E-mail: widi.mineral@gmail.com

Фаджар Нурджаман, д.н., научный сотрудник, Научно-исследовательский центр горных технологий, Национальное агентство исследований и инноваций Индонезии
ORCID: 0000-0002-1329-5296
E-mail: nurjaman_80@yahoo.com

Fajar Nurjaman, Dr., Researcher, Research Center of Mining Technology, National Research and Innovation Agency of Indonesia
ORCID: 0000-0002-1329-5296
E-mail: nurjaman_80@yahoo.com

Эрик Прасетио, к.т.н., научный сотрудник, Научно-исследовательский центр горных технологий, Национальное агентство исследований и инноваций Индонезии; постдокторант кафедры химической технологии, Норвежский университет науки и технологии
ORCID: 0000-0002-8254-839X
E-mail: erik_exploreur@yahoo.com

Erik Prasetyo, PhD, Researcher, Research Center of Mining Technology, National Research and Innovation Agency of Indonesia, Postdoctorate of the Chair of Chemical Engineering, Norwegian University of Science and Technology
ORCID: 0000-0002-8254-839X
E-mail: erik_exploreur@yahoo.com

Сламет Сумарди, научный сотрудник, Научно-исследовательский центр горных технологий, Национальное агентство исследований и инноваций Индонезии
ORCID: 0000-0001-6023-5619
E-mail: slametsumardi99@gmail.com

Slamet Sumardi, Researcher, Research Center of Mining Technology, National Research and Innovation Agency of Indonesia
ORCID: 0000-0001-6023-5619
E-mail: slametsumardi99@gmail.com

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Фатхан Бахфи – разработка концепции, методология, курирование данных, написание первоначальной версии статьи.

Fathan Bahfie – conceptualization, methodology, data duration, writing – original draft.

Азвар Манаф – проведение исследования, визуализация и контроль.

Azwar Manaf – visualization, investigation, supervision.

Види Астуту – проведение исследования, визуализация и контроль.

Widi Astuti – visualization, investigation, supervision.

Фаджар Нурджаман – проведение исследования, подтверждение результатов исследования.

Fajar Nurjaman – investigation, validation.

Эрик Прасетио – проведение исследования, подтверждение результатов исследования.

Erik Prasetyo – investigation, validation.

Сламет Сумарди – анализ, подтверждение результатов исследования.

Slamet Sumardi – analysis, validation.

Поступила в редакцию 16.04.2022
 После доработки 13.05.2022
 Принята к публикации 26.05.2022

Received 16.04.2022
 Revised 13.05.2022
 Accepted 26.05.2022



Оригинальная статья

УДК 669.187

DOI 10.17073/0368-0797-2022-7-479-485

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2341>

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ ПОДАЧИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ СМАЗКИ НА ПРЕСС-ФОРМЫ ЛИТЕЙНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЗАО «РИФАР»

А. В. Нефедов¹, Е. Г. Новиков¹, О. Н. Чиченева²,
Т. Ю. Горовая³, А. Н. Фортунатов³

¹ Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС» (Россия, 426359, Оренбургская обл., Новотроицк, ул. Фрунзе, 8)

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

³ Выксунский филиал НИТУ «МИСиС» (Россия, 607060, Нижегородская область, Выксунский район, рабочий поселок Шиморское, ул. Калинина, 206)

Аннотация. Компания «Рифар» является отечественным изготовителем новой серии биметаллических и алюминиевых секторных радиаторов высокого качества. Изготовление биметаллических радиаторов отопления осуществляется с помощью гидравлического пресса. Для наименьшего прилипания сплава к стенкам пресс-форм (особенно при литье алюминия), для уменьшения износа пресс-форм и для уменьшения задигов на заготовках используется смазка пресс-форм разделительной смазкой, которая забирается из индивидуального промежуточного бака, стоящего около каждого литейного комплекса. При этом смазку заправляют один раз, и она используется на протяжении всей смены, после чего бак с помощью виловых погрузчиков направляется на заправку. Для повышения эксплуатационной надежности и удобства технического обслуживания литейных комплексов предлагается индивидуальную подачу разделительной смазки на пресс-формы литейных комплексов заменить на систему централизованной подачи. Разработана гидравлическая схема, определен объем и конструкция гидравлического бака для концентрата, выполненного из листовой стали с помощью сварки. В результате разработки системы централизованной подачи разделительной смазки на пресс-формы литейных комплексов удалось упростить схему подачи смазки, снизить расходы на топливо и уменьшить трудоемкость технического обслуживания. Замена индивидуальной подачи на централизованную повышает надежность подачи разделительной смазки на пресс-формы литейных комплексов. Расчеты показывают, что реализация проектного решения не требует больших капитальных затрат, а в результате внедрения предлагаемых мероприятий снизится себестоимость продукции на 0,02 %. Срок окупаемости предлагаемого инвестиционного проекта не превышает 1 месяца.

Ключевые слова: пресс для литья под давлением, разделительная смазка, индивидуальная подача смазки

Для цитирования: Нефедов А.В., Новиков Е.Г., Чиченева О.Н., Горовая Т.Ю., Фортунатов А.Н. Разработка системы централизованной подачи разделительной смазки на пресс-формы литейных комплексов ЗАО «Рифар» // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 7. С. 479–485. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-479-485>

Original article

DEVELOPMENT OF A CENTRALIZED SYSTEM FOR SEPARATING LUBRICATION SUPPLY ON PRESS-FORMS OF JSC “RIFAR” CASTING COMPLEXES

A. V. Nefedov¹, E. G. Novikov¹, O. N. Chicheneva²,
T. Yu. Gorovaya³, A. N. Fortunatov³

¹ Novotroitsk Branch of the National University of Science and Technology “MISIS” (8 Frunze Str., Novotroitsk, Orenburg Region 426359, Russian Federation)

² National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

³ Vyksa Branch of the National University of Science and Technology “MISIS” (206 Kalinina Str., Shimorskoe, Vyksa District, Nizhny Novgorod Region 607060, Russian Federation)

Abstract. The company "Rifar" is a domestic manufacturer of a new series of bimetallic and aluminum sector radiators of high quality. Production of bimetallic heating radiators is carried out using a hydraulic press. For the least adhesion of the alloy to the molds walls (especially when casting aluminum) the lubrication of the molds with a separating lubricant is used to reduce the wear of molds and refills on the blanks. Currently, the lubrication of the molds is used. Separating lubricant for the molds is taken from the individual intermediate tank standing near each foundry complex.

In this case, the lubricant is filled once, and it is used throughout the shift. After that, the tank with the help of forklifts is sent to refueling. To increase the operational reliability and ease of maintenance of foundry complexes, it is proposed to replace the individual supply of separating lubricant to the molds of foundry complexes with a centralized supply system. As a result of development of a system for the centralized supply of separating lubricant to casting complexes molds, it was possible to simplify the lubricant supply scheme, to reduce fuel costs and maintenance complexity. Replacing the individual supply of the separating lubricant to the molds of the casting complexes with the centralized supply system improves the reliability of separating lubricant supply to such complexes molds. Calculations showed that implementation of design solutions does not require large capital expenditures, and as a result of the implementation of the proposed measures, the production cost will decrease by 0.02 %; the payback period of the proposed investment project does not exceed 1 month.

Keywords: injection molding press, separating lubricant, individual lubrication supply

For citation: Nefedov A.V., Novikov E.G., Chicheneva O.N., Gorovaya T.Yu., Fortunatov A.N. Development of a centralized system for separating lubrication supply on press-forms of JSC “Rifar” casting complexes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 7, pp. 479–485. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-479-485>

В настоящее время на металлургических предприятиях большое внимание уделяется усовершенствованию существующего оборудования, введению новых передовых технологий, полной автоматизации управления металлургическими процессами с использованием высокопроизводительных компьютерных систем, совершенствованию организации труда и повышению квалификации работающего персонала [1–4]. При этом значительное внимание уделяется выявлению узких [5–8] мест в работе основного технологического оборудования и накоплению данных для разработки организационных и технических мероприятий по снижению внеплановых простоев оборудования [9–13]. Одной из важных проблем металлургической промышленности является повышение надежности оборудования [14–17], которая решается путем модернизации или замены устаревшего оборудования [17–21]. В статье рассматриваются вопросы внедрения в производство устройства централизованной подачи разделительной смазки на пресс-формы литейных комплексов ЗАО «Рифар».

Компания «Рифар» является отечественным изготовителем новой серии биметаллических и алюминиевых секторных радиаторов высокого качества. Они хорошо эксплуатируются в России и странах СНГ как в автономных системах отопления частных домов и коллективных системах теплоснабжения коттеджных поселков, так и в системах центрального отопления многоэтажных сооружений и зданий. Радиаторы «Рифар» хорошо зарекомендовали себя в различных российских регионах и странах СНГ. Высокая надежность радиаторов обеспечивает способность сохранять работоспособность на протяжении долгого времени и дает возможность создавать комфортное тепло при любых функциональных системах отопления [17–18].

В литейном отделении располагается плавильная газовая печь итальянского производства МТХ-300, в которой производится плавка и разливка алюминия. Алюминиевый сплав высокого качества российских производителей, стабильное поддержание постоянной температуры, строгое дозирование объема металла позволяют минимизировать затраты на отходы производства. Для выплавки расплава необходимо использовать

алюминиевые чушки АК12М2 по ГОСТ 1583-93. Загрузка слитков (чушек) и вторичных отходов (литников и облоя) в печь осуществляется автоматическим скиповым подъемником, на штыри которого надевается загрузочная тележка. Для достижения максимальной производительности печи необходимо строго соблюдать порядок и график загрузки шихтовых материалов, предусмотренных нормативными документами [19–20].

Изготовление биметаллических радиаторов отопления осуществляется с помощью гидравлического пресса OL-A 1200. Принцип пресса литья под давлением основывается на принудительном заполнении рабочей формочной полости расплавом и формирование заготовок под действием давления пресс-поршня, перемещающегося в камере прессования, заполненной расплавом [21–26]. В отличие от кокиля, рабочие поверхности пресс-формы, контактирующие с отливкой, не имеют огнеупорного покрытия. Этот процесс приводит к необходимости кратковременного заполнения пресс-форм расплавом и действия на кристаллизирующуюся отливку избыточного давления, в сотни раз больше гравитационного. Реализуемый на современных гидравлических машинах, данный процесс обеспечивает получение в час от десятков до сотен тысяч отливок разного назначения высокого качества, низкой шероховатости, с размерами и поверхностями, соответствующими или максимально приближенными к готовой детали.

На рис. 1 представлено устройство пресса ЗАО «Рифар».

Для наименьшего прилипания сплава к стенкам пресс-форм (особенно при литье алюминия), снижения износа пресс-форм и уменьшения задигов на заготовках используется смазка пресс-форм разделительной смазкой. Также смазываются детали камеры прессования (наполнительный стакан, поршень, пятку).

Для выхода качественных заготовок смазка должна быть нанесена тонким слоем. Ее избыток стекает в форму прессования, не дает полностью заполнить контур пресс-формы и способствует образованию «мороза». Помимо этого, при большом количестве смазки увеличивается образование пузырьков, создающее в пресс-

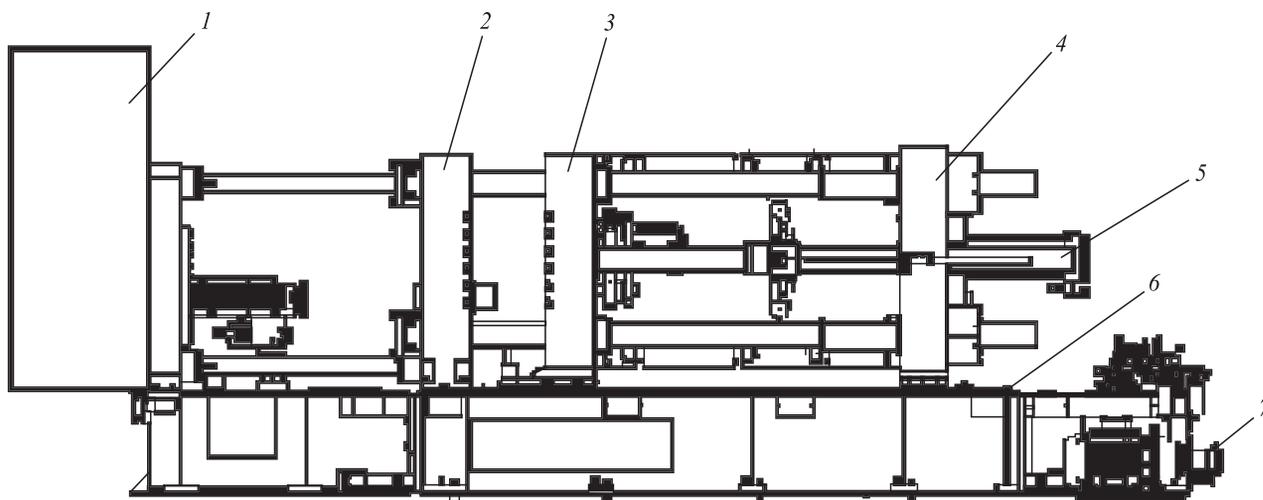


Рис. 1. Устройство пресса для литья под давлением:

1 – плита; 2 – подвижная плита; 3 – неподвижная плита; 4 – гидроаккумуляторы; 5 – станина; 6 – гидронасосы; 7 – гидроцилиндр

Fig. 1. Installation of the injection molding press:

1 – plate; 2 – movable plate; 3 – fixed plate; 4 – hydraulic accumulators; 5 – frame; 6 – hydraulic pumps; 7 – hydraulic cylinder

форме дополнительное давление, что приводит к образованию облоя на отливках (облой – это часть расплава, затекающая в плоскости разъема и остающаяся на отливке).

Смазывать требуется те места пресс-формы, к которым может прилипнуть сплав, и места, оставляющие на заготовке задиры или риски. Смазку стержней и пресс-форм необходимо проводить периодически, в рабочее время, в зависимости от формы отливки. Сложные пресс-формы нужно смазывать чаще, чем простые. Необходимо смазывать детали камеры после нескольких циклов работы. При литье заготовок из латуни первые заготовки после смазывания отбрасывают, так как они насыщены газом и считаются бракованными.

Наилучшим способом нанесения разделительной смазки на все рабочие детали является нанесение пульверизатором, который обеспечивает тонкий и равномерный слой. Разделительные смазки, применяемые для пресс-форм, должны быть стойкими при высокой температуре и давлении, не вызывать коррозию отливок и частей пресс-формы, не быть вредными для работающих, образовывать устойчивую пленку на поверхности пресс-форм и камере прессования.

Смазывающее устройство – узел литейной машины, предназначенный для охлаждения пресс-форм и смазки их рабочей поверхности разделительной смазкой. Оно состоит из блока форсунок, оснащенных системой инъекции. Блок форсунок закреплен на станине, которая передвигается по вертикальной и горизонтальной оси с определенной скоростью, задаваемой оператором через систему управления. Смазка пресс-формы осуществляется автоматическим смазчиком, распыляющим разделительную смазку FONDEROL FK-F-002 на рабочую поверхность подвижной и неподвижной части пресс-формы.

Получение качественной продукции литейного отделения в большой степени зависит от подготовки эмульсии перед использованием. Необходимым условием является правильное соотношение количества концентрата в воде. При недостаточно концентрированной эмульсии будут происходить задиры на заготовках или залипание пресс-форм, при этом производится большое количество бракованных секций алюминиевых радиаторов. Комплексное решение данной проблемы возможно при модернизации подачи эмульсии литейного отделения ЗАО «Рифар». В условиях недостатка материальных ресурсов на техническое переоборудование, особое внимание следует уделять времени, затрачиваемому на заправки промежуточных баков концентрата. Для того, чтобы осуществить процесс смешивания концентрата с водой, используется налаженная система дозирования, которая позволяет поддерживать необходимую концентрацию разделительной смазки в воде.

В настоящее время разделительная смазка для смазки пресс-форм забирается из индивидуального промежуточного бака, стоящего около каждого литейного комплекса (рис. 2). При этом смазку заправляют один раз, и она используется на протяжении всей смены, после чего бак с помощью виловых погрузчиков направляется на заправку.

Более предпочтительным является применение централизованной магистрали для подачи разделительной смазки на литейные комплексы (рис. 3).

Данный вариант является более коммерчески выгодным, так как отпадает необходимость заправки каждого промежуточного бака, что поможет сократить время на заправку каждого отдельного промежуточного бака. Кроме того, упрощается контроль качества подаваемой эмульсии [27 – 32].

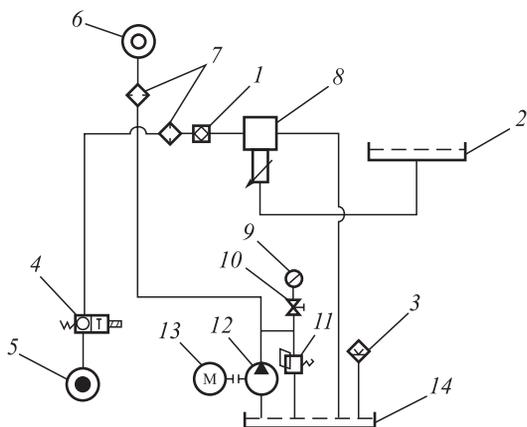


Рис. 2. Схема индивидуальной подачи разделительной смазки на пресс-формы:
 1 – клапан обратный; 2 – бак гидравлический; 3 – датчик уровня;
 4 – распределитель двухпозиционный; 5 – гидравлическая магистраль; 6 – смазывающее устройство; 7 – фильтр; 8 – дозатор; 9 – манометр; 10 – кран; 11 – клапан предохранительный; 12 – насос гидравлический; 13 – мотор электрический; 14 – бак промежуточный

Fig. 2. Scheme of individual supply of separating lubricant to the molds:
 1 – check valve; 2 – hydraulic tank; 3 – level sensor; 4 – two-position distributor; 5 – hydraulic line; 6 – lubricating device; 7 – filter; 8 – dispenser; 9 – pressure gauge; 10 – crane; 11 – safety valve; 12 – hydraulic pump; 13 – electric motor; 14 – intermediate tank

Дозатор 8 устанавливается в сеть водоснабжения и использует давление воды в качестве движущей силы, в результате чего он всасывает разделительную смазку из гидравлического бака 2, дозирует в соответствии с требуемым процентным соотношением и затем смешивает с движущей водой. Полученный раствор направляется в промежуточные баки 14, установленные у каждого литейного комплекса. Из бака 14 гидравлическим насосом 12 раствор подается на смазывающее устройство 6. Вода для дозирования берется из цеховой магистрали 5. В гидравлическом баке для разделительной смазки предусмотрен датчик уровня жидкости.

Расход разделительной смазки $Q_{рс}$, мл/мин, определяется по формуле

$$Q_{рс} = C_{рс} Q_{вод} = 0,02 \cdot 3,4 = 0,068 \text{ л/мин,}$$

где $C_{рс}$ – количество разделительной смазки в воде, $C_{рс} = 0,02$ мл/л; $Q_{вод}$ – расход воды на смешивание, $Q_{вод} = 3,4$ л/мин.

С учетом полученного расхода разделительной смазки определим, какой объем бака $V_{бак}$ необходим для работы всех восьми литейных комплексов ($Z_{лк} = 8$) в течение суток, т. е. при $T_{раб} = 24 \text{ ч} = 1440 \text{ мин}$:

$$V_{бак} = Z_{лк} Q_{рс} T_{раб} = 8 \cdot 0,068 \cdot 1440 = 783 \text{ л.}$$

Таким образом, в качестве емкости для разделительной смазки предлагается использовать бак объемом

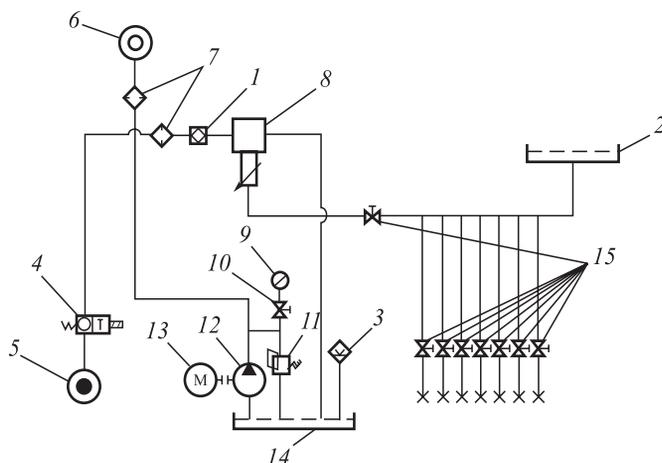


Рис. 3. Схема централизованной подачи разделительной смазки на пресс-формы:
 1 – клапан обратный; 2 – бак гидравлический; 3 – датчик уровня;
 4 – распределитель двухпозиционный; 5 – цеховая магистраль; 6 – смазывающее устройство; 7 – фильтр; 8 – дозатор; 9 – манометр; 10 – кран; 11 – клапан предохранительный; 12 – насос гидравлический; 13 – мотор электрический; 14 – бак промежуточный; 15 – кран аварийный

Fig. 3. Scheme of centralized supply of separating lubricant to the molds:

1 – check valve; 2 – hydraulic tank; 3 – level sensor; 4 – two-position distributor; 5 – shop line; 6 – lubricating device; 7 – filter; 8 – dispenser; 9 – pressure gauge; 10 – crane; 11 – safety valve; 12 – hydraulic pump; 13 – electric motor; 14 – intermediate tank; 15 – emergency crane

$V_{бак} = 800$ л, представленный на рис. 4. Для изготовления бака можно использовать любой имеющийся материал, так как разделительная смазка является достаточно инертной и не вступает в реакцию с поверхностью бака. Изготовление бака предлагается из листовой стали марки Ст3 с помощью применения ручной дуговой сварки. Нагрузка на стенки бака небольшая, поэтому проверочный расчет можно не проводить.

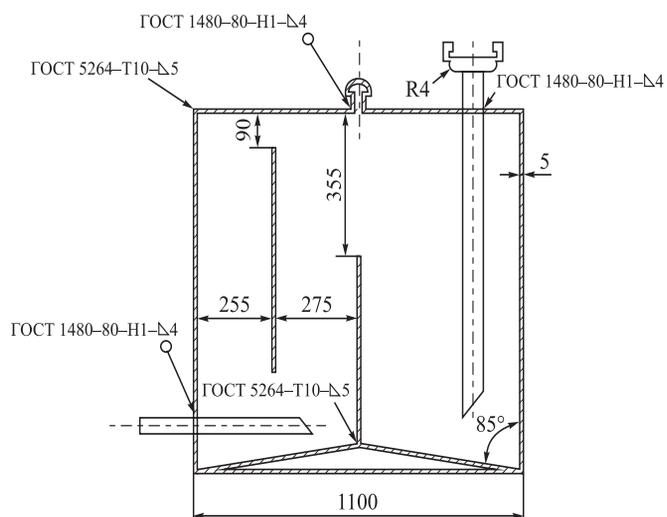


Рис. 4. Гидравлический бак для концентрата

Fig.4. Hydraulic tank for the concentrate

Для подачи разделительной смазки из бака к дозатору используются пластиковые трубки внутренним диаметром 4 мм и внешним диаметром 6 мм. Минимальный диаметр трубки определен, исходя из расхода разделительной смазки и скорости истечения жидкости $V_{pc} = 2$ м/с.

Для оценки экономической эффективности от внедрения централизованной подачи эмульсии составлена смета капитальных затрат, в результате чего установлено, что сумма капитальных вложений составляет около 80 тыс. руб. Основной экономический эффект, ожидаемый от внедрения централизованной подачи эмульсии на литейные комплексы, связан с сокращением расхода топлива для виловых погрузчиков. До модернизации предприятие тратило на топливо 9,66 млн руб. Предлагаемое мероприятие по модернизации позволит уменьшить эти затраты на 1,15 млн руб, что благоприятно скажется на экономике предприятия, учитывая рост цен на топливо. В результате себестоимость одной секции батареи снизилась на 0,1 руб (0,02 %), что при объеме производства

11,5 млн шт. позволило получить значительный экономический эффект. Затраты на внедрение устройства подачи централизованной подачи эмульсии окупятся через 25 дней с начала эксплуатации. Данные показатели доказывают экономическую эффективность разработанного проекта.

Выводы

Разработана централизованная подача эмульсии на литейные комплексы ЗАО «Рифар», что позволило уменьшить затраты на топливо и снизить время на заправку гидравлических баков с разделительной смазкой. Выбраны основные элементы гидравлической системы, определена емкость и разработана конструкция бака для концентрата. Расчеты показывают, что реализация проектного решения не требует больших капитальных затрат, а в результате внедрения предлагаемых мероприятий снизится себестоимость продукции на 0,02 %. Срок окупаемости предлагаемого инвестиционного проекта не превышает 1 месяц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Мажирин Е.А., Чиченев Н.А., Задорожный В.Д. Увеличение срока службы ножей дисковых ножниц для обрезки боковых кромок толстых листов // *Сталь*. 2009. № 1. С. 73–79.
2. Мажирин Е.А., Чиченев Н.А., Задорожный В.Д. Модернизация конструкции блоков станинных роликов черновой клетки толстолистового стана «2800» ОАО «Уральская сталь» // *Сталь*. 2008. № 12. С. 106–108.
3. Chichenev N.A., Gorbatyuk S.M., Naumova M.G., Morozova I.G. Using the similarity theory for description of laser hardening processes // *CIS Iron and Steel Review*. 2020. Vol. 19. P. 44–47. <http://doi.org/10.17580/cisirs.2020.01.09>
4. Горбатюк С.М., Кочанов А.В. Способ механического упрочнения поверхности прокатных валков и устройство для его реализации // *Металлург*. 2012. № 4. С. 73–77.
5. Чиченев Н.А. Импортозаменяющий реинжиниринг привода роликов промежуточного рольганга блюмовой МНЛЗ // *Металлург*. 2014. № 10. С. 57–59.
6. Чиченев Н.А. Реинжиниринг устройства для центрирования сляба в клетки обжимного стана // *Металлург*. 2018. № 7. С. 76–80.
7. Горбатюк С.М., Зарапин А.Ю., Чиченев Н.А. Модернизация вибрационного грохота горнорудного общества «Катока» (Ангола) // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018. № 1. С. 141–149.
8. Горбатюк С.М., Зарапин А.Ю., Чиченев Н.А. Реинжиниринг спирального классификатора горнорудного общества «Катока» (Ангола) // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018. № 2. С. 215–221.
9. Bardovskiy A.D., Gorbatyuk S.M., Keropyan A.M., Bibikov P.Ya. Assessing parameters of the accelerator disk of a centrifugal mill taking into account features of particle motion on the disk surface // *Journal of Friction and Wear*. 2018. Vol. 39. No. 4. P. 326–329. <https://doi.org/10.3103/S1068366618040037>
10. Gorbatyuk S.M., Morozova I.G., Naumova M.G., Chichenev N.A. Effect of laser treatment modes on metal surface marking color // *CIS Iron and Steel Review*. 2020. Vol. 20. P. 37–40. <http://doi.org/10.17580/cisirs.2020.02.09>
1. Mazhirin E.A., Chichenev N.A., Zadorozhnyi V.D. Extending the life of disk cutters for thick strip. *Steel in Translation*. 2009, vol. 39, no. 1, pp. 84–85. <https://doi.org/10.3103/S0967091209010215>
2. Mazhirin E.A., Chichenev N.A., Zadorozhnyi V.D. Modernizing the track units of the 2800 thick-sheet mill at OAO Ural'skaya Stal. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 12, pp. 1048–1050. <https://doi.org/10.3103/S0967091208120255>
3. Chichenev N.A., Gorbatyuk S.M., Naumova M.G., Morozova I.G. Using the similarity theory for description of laser hardening processes. *CIS Iron and Steel Review*. 2020, vol. 19, pp. 44–47. <http://doi.org/10.17580/cisirs.2020.01.09>
4. Gorbatyuk S.M., Kochanov A.V. Method and equipment for mechanically strengthening the surface of rolling-mill rolls. *Metallurgist*. 2012, vol. 56, no. 3–4, pp. 279–283. <https://doi.org/10.1007/s11015-012-9571-2>
5. Chichenev N.A. Import-substituting reengineering of the drive rollers of intermediate roller gear of bloom CCM. *Metallurg*. 2014, no. 10, pp. 57–59. (In Russ.).
6. Chichenev N.A. Reengineering of the slab-centering unit of a roughing mill stand. *Metallurgist*. 2018, vol. 62, no. 7–8, pp. 701–706. <https://doi.org/10.1007/s11015-018-0711-1>
7. Gorbatyuk S.M., Zarpin A.Yu., Chichenev N.A. Retrofit of vibrating screen of Catoca mining company (Angola). *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018, vol. 2018, no. 1, pp. 143–149. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-1-0-143-149>
8. Gorbatyuk S.M., Zarpin A.Yu., Chichenev N.A. Reengineering of spiral classifier of Catoca mining company Ltd, Angola. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2018, vol. 2018, no. 2, pp. 215–221. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2018-2-0-215-221>
9. Bardovskiy A.D., Gorbatyuk S.M., Keropyan A.M., Bibikov P.Ya. Assessing parameters of the accelerator disk of a centrifugal mill taking into account features of particle motion on the disk surface. *Journal of Friction and Wear*. 2018, vol. 39, no. 4, pp. 326–329. <https://doi.org/10.3103/S1068366618040037>
10. Gorbatyuk S.M., Morozova I.G., Naumova M.G., Chichenev N.A. Effect of laser treatment modes on metal surface marking color. *CIS Iron and Steel Review*. 2020, vol. 20, pp. 37–40. <http://doi.org/10.17580/cisirs.2020.02.09>

11. Чиченев Н.А., Шкитов В.С. Реинжиниринг привода вентилятора электросталеплавильного цеха АО «Уральская сталь» // Черные металлы. 2020. № 2. С. 57–61.
12. Keropyan A., Gorbatyuk S. Impact of roughness of interacting surfaces of the wheel-rail pair on the coefficient of friction in their contact area // *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 406–410. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.753>
13. Кириллова Н.Л., Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Горбатюк С.М. Использование газотермического покрытия и обмазки для совершенствования работы воздушных фурм доменных печей // Известия вузов. Черная металлургия. 2013. № 3. С. 3–7. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-3-3-7>
14. Gorbatyuk S.M., Pashkov A.N., Morozova I.G., Chicheneva O.N. Technologies for applying Ni–Au coatings to heat sinks of SiC–Al metal matrix composite material // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 38. Part 4. P. 1889–1893. <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.581>
15. Нефедов А.В., Новикова Ю.В., Чиченева О.Н. Манипулятор для подачи коробка с жидким раствором для ремонта чугуновозных ковшей в доменном цехе АО «Уральская сталь» // Черные металлы. 2021. № 8. С. 4–9.
16. Nefedov A.V., Svichkar V.V., Chicheneva O.N. Re-engineering of equipment to feed the melting furnace with aluminum charge // *Proceedings of the 6th Int. Conf. on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Radionov A.A., Gasiyarov V.R. eds. Cham: Springer, 2021. P. 1198–1204. http://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_139
17. Компания Rifar (Рифар), Россия. URL: http://exemer.ru/article/kompaniya-rifar-rifar_rossiya.html (дата обращения 08.05.22).
18. Оборудование для литья под давлением. URL: http://pmet.biz/oborudovanie/oborudovanie_dlya_lpvvd-2/ (дата обращения 08.05.22).
19. Калядин Н.И., Микаев С.Г., Фисенко С.В. Паспорт литейного плавильного комплекса. Гай: РИФАР, 2017. 42 с.
20. Пеньков А.С., Калядин Н.И., Микаев С.Г., Фисенко С.В. Руководство по эксплуатации ЛКП-01. Гай: РИФАР, 2017. 136 с.
21. Huang L. Aluminum Injection Molding in Product Manufacturing // *RapidDirect*. 2021. URL: <https://www.rapiddirect.com/blog/aluminum-injection-molding/> (дата обращения 08.05.22).
22. 3D printed injection molds in an aluminum frame with the finished injection molded part. URL: <https://formlabs.com/blog/3d-printing-for-injection-molding/> (дата обращения 08.05.22).
23. Bradley R.K. Education in plastics manufacturing: Aluminum mold making and injection molding // *International Journal of Mechanical Engineering Education*. 2021. <http://doi.org/10.1177/030641902111051105>
24. Guide to Aluminium Casting Alloys by Aleris. Grevenbroich: Aleris Recycling, 2011. 102 p.
25. Kaufman J.G., Rooy E.L. Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications. Ohio Materials Park: ASM International, 2004. 321 p.
26. Zhang B., Maijer D.M., Cock-croft S.L. Development of a 3-D thermal model of the low-pressure die-cast (LPDC) process of A356 aluminum alloy wheels // *Materials Science and Engineering*. 2007. Vol. 464. No. 1–2. P. 295–305. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.02.018>
27. Maijer D.M., Owen W.S., Vetter R.A. An investigation of predictive control for aluminum wheel casting via a virtual process model // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. Vol. 209. No. 4. P. 1965–1979. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.057>
28. Jain S., Rajput Y.S. Minimization of defect in aluminum alloy wheel casting using 7 QC tools // *International Journal of Advanced Engineering Research and Technology*. 2015. Vol. 3. No. 8. P. 280–283.
29. Lin J., Carrera S., Kunrath A.O., Zhong D., Myers S., Mishra B., Ried P., Moore J.J. The case for aluminum pressure die-casting // *Surface and Coatings Technology*. 2006. Vol. 201. No. 6. P. 2930–2941. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.06.024>
30. Han Q.-Y. Mechanism of die soldering during aluminum die casting // *China Foundry*. 2015. Vol. 12. No. 2. P. 136–143.
11. Chichenev N.A., Shkitov V.S. Reengineering of a fan drive of the JSC URAL steel electric steelmaking workshop. *Chernye Metally*. 2020, vol. 2020, no. 2, pp. 57–61. (In Russ.).
12. Keropyan A., Gorbatyuk S. Impact of roughness of interacting surfaces of the wheel-rail pair on the coefficient of friction in their contact area. *Procedia Engineering*. 2016, vol. 150, pp. 406-410. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.753>
13. Kirillova N.L., Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Gorbatyuk S.M. Gas-producing shielded coating and thermal covering use to improve blast furnaces air tuyers work. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 3, pp. 3–7. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-3-3-7>
14. Gorbatyuk S.M., Pashkov A.N., Morozova I.G., Chicheneva O.N. Technologies for applying Ni–Au coatings to heat sinks of SiC–Al metal matrix composite material. *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 38, part 4, pp. 1889–1893. <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.581>
15. Nefedov A.V., Novikova Yu.V., Chicheneva O.N. Manipulator for feeding a box with liquid solution for repair of cast iron buckets at blast furnace shop of JSC Ural Steel. *Chernye metally*. 2021, vol. 2021, no. 8, pp. 4–9. (In Russ.).
16. Nefedov A.V., Svichkar V.V., Chicheneva O.N. Re-engineering of equipment to feed the melting furnace with aluminum charge. In: *Proceedings of the 6th Int. Conf. on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Radionov A.A., Gasiyarov V.R. eds. Cham: Springer, 2021, pp. 1198–1204. http://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_139
17. *Rifar Company, Russia*. Available at URL: http://exemer.ru/article/kompaniya-rifar-rifar_rossiya.html (Accessed 08.05.22). (In Russ.).
18. Equipment for injection molding. Available at URL: https://dSPACE.susu.ru/xmlui/bitstream/handle/0001.74/9748/2016_544_ibatulinaos.pdf?isAllowed=y&sequence=1 (Accessed 08.05.22). (In Russ.).
19. Kalyadin N.I., Mikaev S.G., Fisenko S.V. *Passport of the Foundry Smelting Complex*. Gai: RIFAR, 2017, 42 p. (In Russ.).
20. Pen'kov A.S., Kalyadin N.I., Mikaev S.G., Fisenko S.V. *Manual for LKP-01*. Gai: RIFAR, 2017, 136 p. (In Russ.).
21. Huang L. *Aluminum injection molding in product manufacturing*. *RapidDirect*. 2021. Available at URL: <https://www.rapiddirect.com/blog/aluminum-injection-molding/> (Accessed 08.05.22).
22. *3D printed injection molds in an aluminum frame with the finished injection molded part*. Available at URL: <https://formlabs.com/blog/3d-printing-for-injection-molding/> (Accessed 08.05.22).
23. Bradley R.K. Education in plastics manufacturing: Aluminum mold making and injection molding. *International Journal of Mechanical Engineering Education*. 2021. <http://doi.org/10.1177/030641902111051105>
24. *Guide to Aluminium Casting Alloys by Aleris*. Grevenbroich: Aleris Recycling, 2011, 102 p.
25. Kaufman J.G., Rooy E.L. *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications*. Ohio Materials Park: ASM International, 2004, 321 p.
26. Zhang B., Maijer D.M., Cock-croft S.L. Development of a 3-D thermal model of the low-pressure die-cast (LPDC) process of A356 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering*. 2007, vol. 464, no. 1–2, pp. 295–305. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.02.018>
27. Maijer D.M., Owen W.S., Vetter R.A. An investigation of predictive control for aluminum wheel casting via a virtual process model. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009, vol. 209, no. 4, pp. 1965–1979. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.04.057>
28. Jain S., Rajput Y.S. Minimization of defect in aluminum alloy wheel casting using 7 QC tools. *International Journal of Advanced Engineering Research and Technology*. 2015, vol. 3, no. 8, pp. 280–283.
29. Lin J., Carrera S., Kunrath A.O., Zhong D., Myers S., Mishra B., Ried P., Moore J.J. The case for aluminum pressure die-casting. *Surface and Coatings Technology*. 2006, vol. 201, no. 6, pp. 2930–2941. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.06.024>
30. Han, Q.-Y. Mechanism of die soldering during aluminum die casting. *China Foundry*. 2015, vol. 12, no. 2, pp. 136–143.

- | | |
|---|---|
| <p>31. Djurdjevic M.B., Odanovic Z., Pavlovic-Krstic J. Melt quality control at aluminum casting plants // <i>Metalurgija</i>. 2010. Vol. 16. No. 1. P. 63–76.</p> <p>32. Joyce M., Rebros M., Ramrattan S. Adapting more progressive refractory coating measurement controls // <i>International Journal of Metalcasting</i>. 2008. Vol. 2. No. 4. P. 29–39.
https://doi.org/10.1007/BF03355434</p> | <p>31. Djurdjevic M.B., Odanovic Z., Pavlovic-Krstic J. Melt quality control at aluminum casting plants. <i>Metalurgija</i>. 2010, vol. 16, no. 1, pp. 63–76.</p> <p>32. Joyce M., Rebros M., Ramrattan S. Adapting more progressive refractory coating measurement controls. <i>International Journal of Metalcasting</i>. 2008, vol. 2, no. 4, pp. 29–39.
https://doi.org/10.1007/BF03355434</p> |
|---|---|

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрей Викторович Неведов, к.пед.н., доцент, заместитель директора, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС»
E-mail: cosnovotr@rambler.ru

Andrei V. Nefedov, Cand. of Pedagogic Sci., Assist. Prof., Deputy Director, Novotroitsk Branch of the National University of Science and Technology “MISIS”
E-mail: cosnovotr@rambler.ru

Евгений Геннадьевич Новиков, студент, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС»
E-mail: nfmisis@yandex.ru

Evgenii G. Novikov, Student, Novotroitsk Branch of the National University of Science and Technology “MISIS”
E-mail: nfmisis@yandex.ru

Ольга Николаевна Чиченева, к.т.н., доцент, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
E-mail: chich38@mail.ru

Ol'ga N. Chicheneva, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., National University of Science and Technology “MISIS”
E-mail: chich38@mail.ru

Татьяна Юрьевна Горовая, заместитель директора по учебно-методической работе, Выксунский филиал НИТУ «МИСиС»
E-mail: gorovat@mail.ru

Tat'yana Yu. Gorovaya, Deputy Director for Educational and Methodical Work, Vyksa Branch of the National University of Science and Technology “MISIS”
E-mail: gorovat@mail.ru

Александр Николаевич Фортунатов, доцент кафедры технологии и оборудования обработки металлов давлением, Выксунский филиал НИТУ «МИСиС»
E-mail: fortan1979@mail.ru

Aleksandr N. Fortunatov, Assist. Prof. of the Chair “Technology and Equipment for Metal Forming”, Vyksa Branch of the National University of Science and Technology “MISIS”
E-mail: fortan1979@mail.ru

Вклад авторов

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

А. В. Неведов – идея работы, научное руководство.

A. V. Nefedov – formation of the main idea of the work, scientific guidance.

Е. Г. Новиков – проведение патентного поиска.

E. G. Novikov – conducting a patent search.

О. Н. Чиченева – поиск и анализ публикаций, входящих в наукометрические базы.

O. N. Chicheneva – conducting search and analysis of publications included in the scientific metric bases.

Т. Ю. Горовая – формирование цели и задачи исследования, подготовка текста, корректировка выводов.

T. Yu. Gorovaya – formation of the goal and objectives of the study, preparation of the text, correction of conclusions.

А. Н. Фортунатов – анализ результатов исследований, формирование выводов, окончательное редактирование текста.

A. N. Fortunatov – analysis of the research results, formation of conclusions, final editing of the text.

Поступила в редакцию 01.02.2022

Received 01.02.2022

После доработки 20.04.2022

Revised 20.04.2022

Принята к публикации 25.04.2022

Accepted 25.04.2022



Оригинальная статья

УДК 625.143.48

DOI 10.17073/0368-0797-2022-7-486-493

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2342>

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

Н. А. Козырев¹, Л. П. Бащенко², Р. А. Шевченко², А. Р. Михно²¹Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина (Россия, 105005, Москва, ул. Радио, 23/9)²Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Оптимизация технологического процесса изготовления длинномерных рельсовых плетей является сложной задачей, так как помимо большого количества операций, используемое сегодня для контактной стыковой сварки железнодорожных рельсов методом пульсирующего оплавления оборудование имеет большое количество технологических параметров (входных факторов), воздействующих на качество получаемого сварного стыка (выходные факторы). Такое количество параметров не позволяет в полной мере подобрать оптимальные режимы сварки и приводит к невозможности применения полного или дробного факторного эксперимента. В работе с помощью регрессионного анализа проведена обработка данных 79 опытных сварок. Выделены основные этапы процесса сварки: первый этап оплавления; второй этап оплавления; форсировка; осадка. Исходя из полученных осциллограмм процесса сварки на рельсосварочной машине K1100 при сварке рельсов типа R65 категории ДТ350, определены средние значения силы тока, напряжения, скорости перемещения подвижной станины на различных этапах оплавления, а также усилия осадки, время осадки под током, пути осадки на последнем этапе. Полученные регрессионные уравнения, определяющие результаты испытаний на статический трехточечный изгиб, были проанализированы и из них исключены неудовлетворяющие параметры по t -критерию Стьюдента. Полученные в конечном итоге регрессионные уравнения учитывают влияние каждого технологического этапа процесса контактной стыковой сварки железнодорожных рельсов на выходные свойства и модель является адекватной по F -критерию Фишера. С помощью данных регрессионных моделей получены рекомендованные режимы контактной стыковой сварки пульсирующим оплавлением и проведено их опробование на рельсосварочном предприятии.

Ключевые слова: контактная стыковая сварка, рельсовая сталь, искровой промежуток, сила тока, этапы оплавления, регрессионное уравнение

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

Для цитирования: Козырев Н.А., Бащенко Л.П., Шевченко Р.А., Михно А.Р. Оптимизация режима контактной стыковой сварки железнодорожных рельсов // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 7. С. 486–493. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-486-493>

Original article

OPTIMIZING THE MODE OF CONTACT BUTT WELDING OF RAILWAY RAILS

N. A. Kozыrev¹, L. P. Bashchenko², R. A. Shevchenko², A. R. Mikhno²¹I.P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy (23/9 Radio Str., Moscow 105005, Russian Federation)²Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

Abstract. Optimization of the technological process of manufacturing long-length rail lashes is a difficult task, since in addition to a large number of operations, the equipment used today for contact butt welding of railway rails by pulsating reflow has a large number of technical parameters (input factors) affecting the quality of the resulting welded joint (output factors). Such a number of parameters does not allow us to fully select the optimal welding modes and leads to the impossibility of using a full or fractional factor experiment. In the work, data processing of 79 experimental welds was carried out using regression analysis. The main stages of the welding process are highlighted: the first stage is melting; the second stage is melting, forcing, precipitation. Based on the obtained oscillograms of the welding process on the K1100 rail welding machine, average values of current, voltage, speed of movement of the movable bed were obtained at various stages of melting, as well as precipitation forces, precipitation time under current, precipitation paths at the last stage when welding R65 rails of the DT350 category. The obtained regression equations determining the results of tests for static three-point bending were analyzed and unsatisfactory parameters according to the Student's t -criterion were excluded from them. These equations in the end take into account the influence of each technological stage of the process of contact butt welding of railway rails on the output properties and the model is adequate according to the Fischer's F -criterion. With the help of these regression models, the recommended modes of contact butt welding by pulsating reflow were obtained and their testing was carried out at a rail welding company.

Keywords: contact butt welding, rail steel, spark gap, current strength, melting stages, regression equation

Funding: The research was supported by RFBR and the Kemerovo region – Kuzbass within the framework of the scientific project No. 20-48-420003 “Development of physico-chemical and technological foundations for creating a fundamentally new method of welding differentially heat-strengthened railway rails”.

For citation: Kozyrev N.A., Bashchenko L.P., Shevchenko R.A., Mikhno A.R. Optimizing the mode of contact butt welding of railway rails. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 7, pp. 486–493. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-486-493>

ВВЕДЕНИЕ

Железные дороги обеспечивают перевозку грузов и пассажиров в больших объемах и на большие расстояния, при этом с каждым годом растет общий объем перевозок и грузонапряженность пути. Все это приводит к необходимости строительства новых и ремонта старых железнодорожных путей [1 – 3].

При этом основная нагрузка ложится на рельсы, а стыки рельсов являются наиболее слабым местом пути, так как в них возникает дополнительное динамическое воздействие колеса на рельс. Основным способом уменьшения данного воздействия с давних пор является увеличение длины рельсов с уменьшением количества стыков [4, 5].

В настоящее время прогрессивной конструкцией железнодорожного полотна является бесстыковая путь, который позволяет создавать скоростные железнодорожные магистрали при отсутствии стыков рельсов с применением прогрессивных ресурсосберегающих технологий строительства и технического обслуживания железнодорожного пути. Наиболее эффективным по технико-экономическим показателям способом соединения рельсов в бесстыковой путь является их электроконтактная сварка. В настоящее время применяется метод пульсирующего оплавления, который позволяет выбирать оптимальный термический цикл при сварке рельсов в зависимости от химического состава стали. Вместе с тем, существуют трудности по сварке высокоуглеродистой стали, из которой состоят рельсы: необходимость термообработки после сварки для получения нормативных показателей механических свойств, непостоянство механических показателей от сварки к сварке. При этом дефекты в сварном стыке занимают 35 % всех видов дефектов. В настоящее время на рельсосварочных предприятиях показателем качества сварки являются результаты сплошного ультразвукового контроля сварных стыков, а также результаты механических испытаний образцов сваренных рельсов на трехточечный изгиб с получением значений усилия при изгибе и величины стрелы прогиба [6, 7]. Поэтому важно провести анализ изменения показателей механических свойств стыков в зависимости от изменения технологических параметров сварки, а также оптимизацию параметров сварки с целью повышения качества сварных стыков рельсов.

Целью настоящей работы является повышение качества сварных стыков дифференцированно упроч-

ненных железнодорожных рельсов, сваренных электроконтактным способом путем оптимизации технологических параметров.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Оптимизация параметров проводилась по алгоритму, представленному на рис. 1. Работа состояла из следующих этапов:

- сбор данных по пяти этапам сварки;
- корреляционный анализ;
- расчет параметров и построение регрессионных моделей для каждого этапа сварки рельсов (10 уравнений для каждой машины – по выходным параметрам (усилию изгиба и стреле прогиба));
- выяснение статистической значимости, т. е. пригодности модели для использования ее в целях прогнозирования значений отклика;
- выявление выбросов и их удаление;
- выбор наиболее значимых факторов с дальнейшим их включением в общую модель;
- подстановка в модель оптимальных значений параметров на основе знаков регрессионного уравнения и апробация полученного режима [8 – 10].

Для оптимизации процесса контактной стыковой сварки рельсов [11, 12] пульсирующим оплавлением на машинах K1100 в условиях рельсосварочного предприятия был использован регрессионный анализ производственных данных контроля сварки рельсов и испытания образцов рельсов на статический изгиб [13 – 15]. Сбор данных проводился в два этапа. Сначала были собраны данные сварки рельсов и испытаний на статический поперечный изгиб за два месяца по трем машинам K1100. На втором этапе после нахождения оптимальных значений параметров по трем машинам были собраны данные сварок и испытаний на одной машине K1100 [16 – 18].

Производственные данные обрабатывались с использованием пакета прикладных программ Statistica 10.0. Одним из его важных свойств является быстрое действие при работе с большим объемом данных и вычислительная мощность приложений, требующих регулярного построения запросов к базам данных и комплексного управления данными. Также пакет программ включает в себя графический модуль, содержащий удобные инструменты для визуализации данных и проведения графического анализа [19, 20].

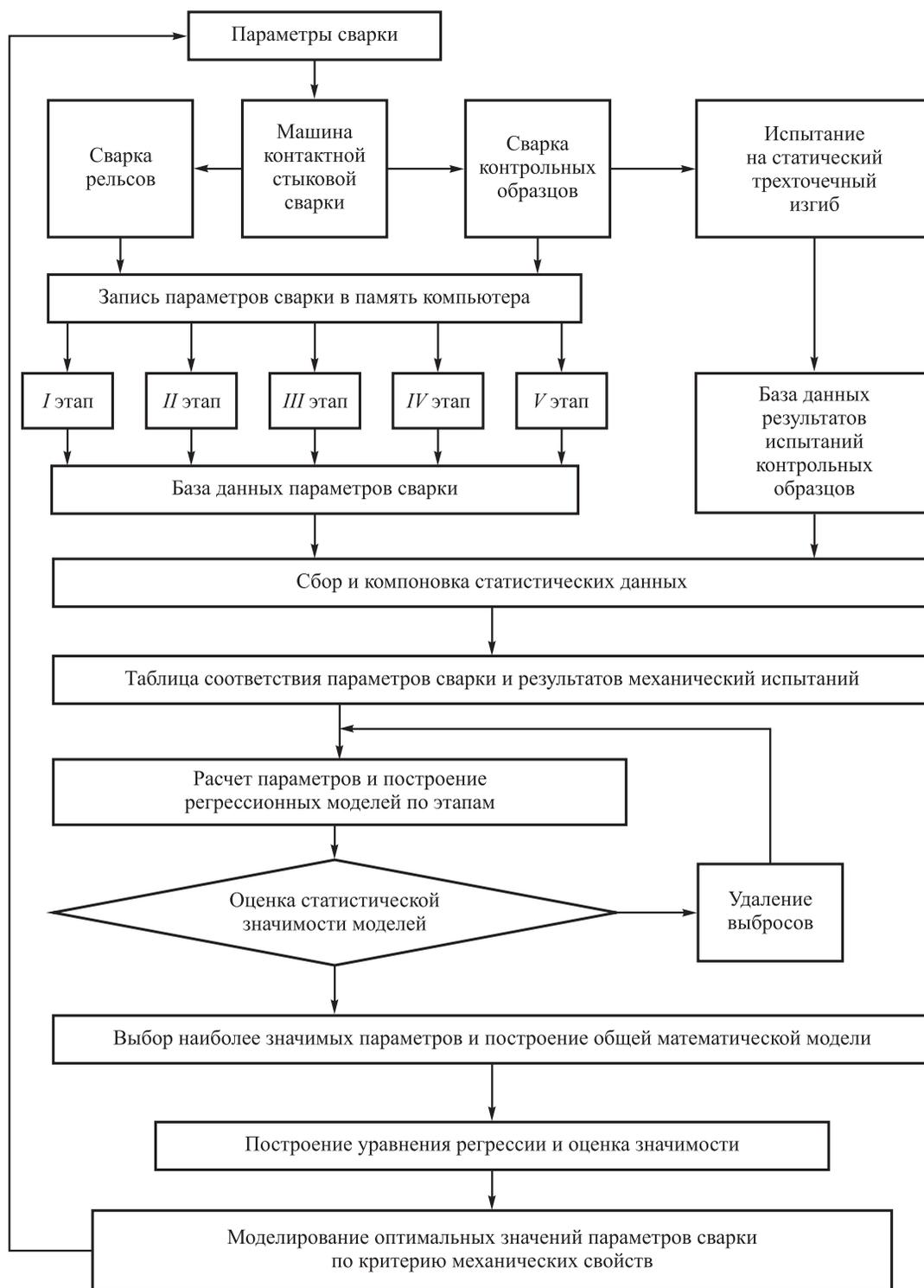


Рис. 1. Алгоритм проведения исследований

Fig. 1. Research algorithm

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На машине К1100 было сварено 79 стыков, которые в последующем были испытаны на статический трехточечный изгиб. В табл. 1 приведены интервалы значений контролируемых параметров, где $T_{нач}$, $T_{длит}$ – длительность первого и второго этапа оплавления; I – сила

тока, A ; U – напряжение, В; V – скорость сварки (движения подвижной станины), мм/с; P – давление в гидросистеме, атм.; S – путь, мм.

На каждом этапе (первый этап оплавления, второй этап оплавления, форсировка, осадка, гратосъем) были построены регрессионные модели с выходными параметрами $P_{изг}$ и $f_{пр}$ и рассчитаны коэффициенты детер-

Интервалы значений параметров сварки на рельсосварочной машине

Table 1. Intervals of values of welding parameters on a rail welding machine

Название этапа	Интервалы значений параметров сварки					
	<i>T</i> , с	<i>I</i> , А	<i>U</i> , В	<i>P</i> , атм.	<i>V</i> , мм/с	<i>S</i> , мм
I этап оплавления	28 – 46	7 – 1088	335 – 440	27 – 42	0,00 – 0,67	4,4 – 5,4
II этап оплавления	60 – 100	24 – 736	148 – 424	26 – 35	0,22 – 0,89	7,0
Форсировка	4,2 – 6,1	110 – 788	280 – 443	27 – 33	1,33 – 1,89	6,5
Осадка	1,1 – 3,0	6 – 1174	2 – 423	25 – 129	1,56 – 9,33	17,8 – 18,6
Гратосъем	1,0	2 – 324	1 – 105	71 – 129	0,11 – 0,56	0,1 – 1,0

минации, где $P_{изг}$ – усилие изгиба, кН; $f_{пр}$ – стрела прогиба, мм; $S_{прип}$, $S_{поз}$ – путь, пройденный станиной при припуске на оплавление и на начальном этапе, мм; нижние индексы «ср», «мин» и «макс» означают среднее, минимальное и максимальное:

– модель первого этапа оплавления

$$P_{изг} = 5129,96 + 49,02V_{ср} + 9,63V_{мин} + 12,54V_{макс} - 10,14S_{прип} - 3,92S_{поз} - 51,61P_{ср} + 6,82P_{мин} + 19,54P_{макс} + 8,59U_{ср} - 7,95U_{мин} - 2,69U_{макс} - 3,72I_{ср} + 1,51I_{мин} - 1,21I_{макс} - 2,24T_{длит},$$

$$R^2 = 0,24,$$

$$f_{пр} = -100,44 + 3,22V_{ср} + 1,01S_{поз} - 2,96P_{мин} - 0,61P_{макс} + 0,55U_{ср} - 0,35U_{макс} + 0,08I_{ср} + 0,10I_{макс} - 0,22,$$

$$R^2 = 0,50;$$

– модель второго этапа оплавления

$$P_{изг} = 11\,497,07 + 57,11V_{ср} + 178,46V_{мин} - 86,14V_{макс} - 6,99S_{прип} - 2,12S_{поз} - 119,85P_{ср} - 69,42P_{мин} - 21,97P_{макс} - 11,16U_{ср} + 0,45U_{мин} - 0,49U_{макс} + 2,40I_{ср} + 5,24I_{мин} + 1,70I_{макс} - 0,22T_{длит} - 1,39T_{нач},$$

$$R^2 = 0,20,$$

$$f_{пр} = -436,24 + 1,92V_{ср} + 7,94V_{мин} - 0,49V_{макс} + 5,92S_{прип} + 0,332S_{поз} - 0,03P_{ср} - 0,24P_{мин} - 4,47P_{макс} + 0,56U_{ср} + 0,07U_{мин} - 0,11U_{макс} + 0,22I_{ср} - 0,05I_{мин} - 0,02I_{макс} - 0,03T_{длит},$$

$$R^2 = 0,27;$$

– модель на этапе форсировки

$$P_{изг} = 5792,22 + 159,64V_{ср} + 60,29V_{мин} + 33,69V_{макс} + 4,72S_{прип} - 15,53S_{поз} + 52,83P_{ср} - 130,84P_{мин} + 55,38P_{макс} - 11,82U_{ср} + 0,15U_{мин} + 11,43U_{макс} - 4,71I_{ср} - 0,35I_{мин} - 0,29I_{макс} + 14,28T_{длит} - 0,29T_{нач},$$

$$R^2 = 0,15,$$

$$f_{пр} = -75,95 - 4,68V_{ср} + 4,30V_{мин} + 1,47V_{макс} + 1,90S_{прип} - 0,37S_{поз} + 0,82P_{ср} - 2,30P_{мин} - 2,98P_{макс} + 0,19U_{ср} - 0,04U_{мин} + 0,21U_{макс} + 0,04I_{ср} - 0,02I_{мин} + 0,57T_{длит},$$

$$R^2 = 0,20;$$

– модель на этапе осадки

$$P_{изг} = -1856,13 + 200,10V_{ср} - 43,91V_{мин} + 6,52V_{макс} - 18,40S_{прип} - 15,05S_{поз} + 22,86P_{ср} - 3,32P_{мин} + 61,72P_{макс} + 7,28U_{ср} - 0,07U_{мин} - 13,67U_{макс} - 2,63I_{ср} - 0,19I_{мин} + 3,92I_{макс} + 39,64T_{длит} - 0,43T_{нач},$$

$$R^2 = 0,24,$$

$$f_{пр} = -161,50 + 2,00V_{ср} - 0,01V_{мин} + 0,16V_{макс} - 0,14S_{прип} - 0,26S_{поз} - 0,82P_{ср} + 0,10P_{мин} + 2,42P_{макс} + 0,11U_{ср} - 0,06U_{макс} - 0,02I_{ср} - 0,01I_{мин} + 0,03I_{макс} + 0,79T_{длит} - 0,01T_{нач},$$

$$R^2 = 0,15;$$

– модель на этапе гратосъема

$$P_{изг} = 2878,60 + 941,99V_{ср} + 72,97V_{макс} - 128,93S_{прип} - 1,88S_{поз} + 104,21P_{ср} - 84,19P_{мин} - 13,36P_{макс} + 5,19U_{ср} - 102,99U_{мин} + 54,51U_{макс} + 19,41I_{ср} - 0,55I_{мин} - 20,33I_{макс} - 0,47T_{нач},$$

$$R^2 = 0,36,$$

$$f_{пр} = 97,35 - 36,29V_{ср} - 2,95V_{макс} + 2,83S_{прип} - 0,13S_{поз} + 3,31P_{ср} - 2,08P_{мин} - 1,30P_{макс} + 1,09U_{ср} - 3,80U_{мин} + 0,91U_{макс} + 1,56I_{ср} - 1,07I_{мин} - 0,56I_{макс},$$

$$R^2 = 0,18.$$

Коэффициенты детерминации для каждой модели низкие. Это говорит о том, что входные переменные на каждом отдельном этапе процесса контактной сварки не в полной мере отражают свое влияние на выходные параметры. Очевидно, что каждый из этапов оказывает влияние на выходные параметры, но полное влияние

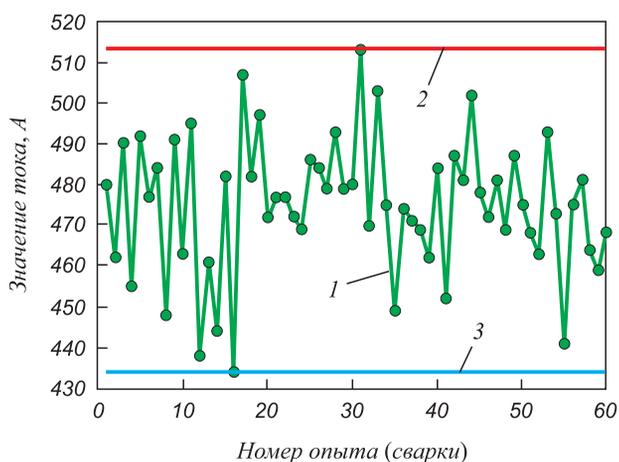


Рис. 2. Разброс средних значений тока на I этапе оплавления: 1 – фактические значения; 2 и 3 – максимум и минимум

Fig. 2. Spread of the average current values at melting stage I: 1 – actual values; 2 and 3 – maximum and minimum

входных переменных можно оценить только в совокупности этих этапов.

Отбросив неудовлетворяющие параметры по *t*-критерию Стьюдента и собрав значимые параметры каждого этапа в одном уравнении, получили следующие модели, описывающие для машины К1100 весь процесс в целом:

$$P_{изг} = 814,08 - 12,93I_{макс5} + 40,84U_{макс5} - 0,64T_{нач4} - 0,26I_{мин4} + 3,20I_{макс4} - 6,29U_{макс4} - 2,12P_{мин4} + 41,79P_{макс4} + 53,33V_{ср4} + 6,60I_{ср1} - 219,91P_{ср1},$$

$$R^2 = 0,79;$$

$$f_{пр} = -194,21 - 0,24I_{макс5} - 0,02T_{нач4} + 0,07I_{макс4} + 2,43P_{макс4} - 0,75P_{ср4} + 1,94V_{ср4} + 0,01I_{макс3} + 0,05T_{длит4} + 0,08I_{ср1} - 3,32P_{ср1},$$

$$R^2 = 0,71.$$

Из 79 наблюдений после удаления выбросов осталось 62. Значимость по *F*-критерию Фишера (для $P_{изг}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$: $F_{факт} = 9,88 > F_{кр} = 0,38$; для $f_{пр}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$: $F_{факт} = 6,90 > F_{кр} = 0,38$). Для $P_{изг}$ средняя ошибка аппроксимации составляет 2,8 %. Для $f_{пр}$ средняя ошибка аппроксимации равна 5 % (при условии $\varepsilon \leq 10$).

Токовые границы первого этапа показаны на рис. 2. Режимы сварки с измененными значимыми параметрами указаны в табл. 2. Работа модели при изменении параметра $I_{ср}$ на первом этапе приведена на рис. 3.

Уровень корреляции между усилием изгиба и стрелой прогиба при испытании на изгиб в зависимости от применяемой машины показан на рис. 4. Таким образом видно, что процесс можно моделировать только по одной зависимой переменной, так как вторая переменная также изменяется.

На данном этапе были найдены по полученным моделям оптимальные параметры на основе знаков коэффициентов регрессии (табл. 3). При выборе наиболее

Т а б л и ц а 2

Режимы сварки с измененным значением $I_{ср1}$ и производственные параметры

Table 2. Welding modes with a modified $I_{ср1}$ value and production parameters

Параметр	$P_{ср1}$, атм.	$I_{ср1}$, А	$V_{ср4}$, мм/с	$P_{макс4}$, атм.	$P_{мин4}$, атм.	$U_{макс4}$, В	$I_{макс4}$, А	$I_{мин4}$, А	$T_{нач4}$, с	$U_{макс5}$, В	$I_{макс5}$, А	$P_{изг}$, кН	$f_{пр}$, мм
Режим	31	448	8,56	123	99	372	1109	975	128,3	102	314	2670	37,1
Модель	31	448	8,56	123	99	372	1109	975	128,3	102	314	2580	38,2

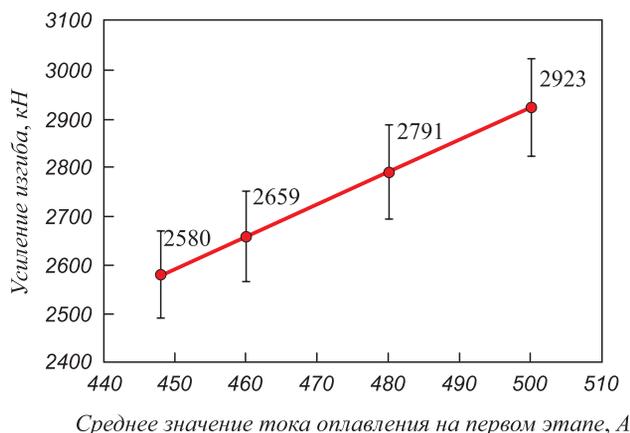


Рис. 3. Зависимость усилия изгиба от среднего значения тока на первом этапе оплавления

Fig. 3. Dependence of the bending force on the average value of current at melting stage I

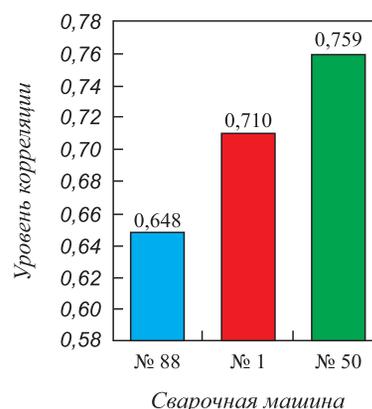


Рис. 4. Корреляционная зависимость между усилием изгиба и стрелой прогиба при испытании на изгиб в зависимости от применяемой машины

Fig. 4. Correlation between the bending force and the deflection boom during the bending test, depending on the machine used

Таблица 3

Оптимальные значения параметров машины K1100

Table 3. Optimal values of K1100 unit parameters

Параметр	$P_{\text{ср1}},$ атм.	$I_{\text{ср1}},$ А	$V_{\text{ср4}},$ мм/с	$P_{\text{макс4}},$ атм.	$P_{\text{мин4}},$ атм.	$U_{\text{макс4}},$ В	$I_{\text{макс4}},$ А	$I_{\text{мин4}},$ А	$T_{\text{нач4}},$ с	$U_{\text{макс5}},$ В	$I_{\text{макс5}},$ А
Знак уравнения	–	+	+	+	–	–	+	–	–	+	–
Минимум	30	434	1,56	123	25	359	1074	6	99,1	2	6
Максимум	32	521	9,33	129	124	423	1174	1075	144,9	105	324
Оптимальный	30	521	9,33	129	25	359	1174	6	99,1	105	324

благоприятных параметров значений усилие изгиба $P_{\text{изг}}$ составляет 8437,37 кН. Расчетное значение $P_{\text{изг}}$ практически в три раза выше среднего. На реальном процессе данные режимы осуществить невозможно, так как на пятом этапе оплавление не происходит, ток протекает уже по всему сечению сварного рельса. В результате нет возможности осуществлять регулировку силы тока оплавления с помощью передвижения подвижной станины (в данном случае сила тока пропорциональна напряжению). Поэтому одновременная подстановка минимального значения напряжения и максимального значения силы тока некорректна. Подставляя сначала максимальные значения, а потом минимальные значения напряжения и тока пятого этапа ($U_{\text{макс5}}, I_{\text{макс5}}$), получим наиболее близкие к истине значения усилия при изгибе 3923,07 и 3828,29 кН соответственно. Таким образом, наличие тока после осадки в свариваемых рельсах положительно влияет на качество сварного соединения. Значение $T_{\text{нач4}}$ также указывает на то, что минимальное время оплавления позволяет получить лучшие показатели качества. Прогнозируемые по данным моделям регрессии значения усилия при изгибе и

стрелы прогиба составляют 3923,07 кН и 75,83 мм соответственно.

Выводы

Разработаны математические модели процесса контактной сварки рельсов на машине K1000, которые позволяют оценить полноту влияния параметров технологического процесса контактной сварки рельсов на качество сварного шва. С помощью регрессионных моделей предлагается прогнозировать качество сварного шва и управлять технологическими параметрами процесса контактной сварки рельсов. На основе выбора значимых факторов получены общие модели процесса сварки с учетом влияния параметров каждого этапа на весь процесс сварки. Проведена апробация полученных моделей в условиях рельсосварочного предприятия. Выявлено, что одной из причин снижения механических свойств рельсов, а именно усилия при изгибе и стрелы прогиба, является невозможность поддерживать в пределах режимов средний ток на каждом этапе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Роботизированный рельсоварочный агрегат // Железные дороги мира. 2012. № 12. С. 64–67.
2. Mortazavian E., Wang Z., Teng H. Repair of light rail track through restoration of the worn part of the railhead using submerged arc welding process // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 107. No. 7–8. P. 3315–3332. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05208-x>
3. Сергиенко Ю.В., Жук В.И. Зварювання стиків рейок в польових умовах // Актуальні наукові дослідження в сучасному світі. 2021. № 1–1 (69). P. 237–240.
4. Шур Е.А., Резанов В.А. Комплексный метод контактной сварки рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 3. С. 20–22.
5. Gavrilov P., Ivanov V. Analysis of rail profile 610 E1 joints welded by means of mobile rail welding machine // Proceedings of the Int. Sci. Conf. "Engineering for Rural Development". 2018. Vol. 17. P. 1969–1977. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N021>
6. Резанов В.А. Методика исследования изменения температуры на различном расстоянии от стыков при сварке рельсов // Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 4. С. 40–43.
7. Карпачевский В.В., Новакович М.В., Залавский В.Н. О сварке рельсовых плетей при низких температурах с одновременным восстановлением их температуры закрепления с применением подогрева // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. 2016. № 4. С. 30–32.
8. Gong L., Zhu L., Zhou H.X. Effect on hardness and microstructures of rail joint with ultra-narrow gap arc welding by post weld heat treatment // Key Engineering Materials. 2017. Vol. 737. P. 90–94. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.737.90>
9. Гладков Э.А. Управление процессами и оборудованием при сварке. Москва: Академия, 2006. 432 с.
10. Voronin N.N., Seydakhmetov N.B., Rezanov V.A. The influence of technological parameters on the thermal cycle at butt flash welding of rails // Welding International. 2019. Vol. 33. No. 7–9. P. 328–334. <https://doi.org/10.1080/09507116.2021.1881346>
11. Mutton P., Cookson J., Qiu C., Welsby D. Microstructural characterisation of rolling contact fatigue damage in flashbutt welds // Wear. 2016. Vol. 366–367. P. 368–377. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.020>
12. Tawfik D.P., Mutton P.J., Chiu W.K. Experimental and numerical investigations: Alleviating tensile residual stresses in flash-butt welds by localised rapid post-weld heat treatment // Journal of Materials Processing Technology. 2008. Vol. 196. No. 1–3. P. 279–291. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.05.055>
13. Voronin N.N., Seydakhmetov N.B., Rezanov V.A. Development of the combined flashing method in welding of rails // Welding International. 2017. Vol. 31. No. 12. P. 984–987. <https://doi.org/10.1080/09507116.2017.1369066>
14. Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А. Разработка новой технологии сварки рельсов для высокоскоростного движения // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 8 (1424). С. 50–57. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2018-8-50-57>
15. Полевой Е.В., Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Кушев Д.Ю., Юнусов А.М. Исследование неметаллических включений, образующихся при электроконтактной сварке рельсовой стали // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2019. № 1 (27). С. 8–12.
16. Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Крюков Р.Е., Михно А.Р. Исследование износостойкости сварного стыка железнодорожных рельсов // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2020. Т. 76. № 8. С. 818–825. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-8-818-825>
17. Соболев А.А., Тазигов Э.Б., Жуков Д.А. Применение технологии фирмы Elektro-Thermit для сварки рельсов в России // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2004. № 3. С. 89–91.
1. Robotic rail welding unit. *Zheleznyye dorogi mira*. 2012, no. 12, pp. 64–67. (In Russ.).
2. Mortazavian E., Wang Z., Teng H. Repair of light rail track through restoration of the worn part of the railhead using submerged arc welding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020, vol. 107, no. 7–8, pp. 3315–3332. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05208-x>
3. Sergienko Yu.V., Zhuk V.I. Welding of rail joints in the field. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sroemnom mire*. 2021, no. 1–1 (69), pp. 237–240. (In Ukr.).
4. Shur E.A., Rezanov V.A. Integrated method of contact welding of rails. *Vestnik VNIIZhT*. 2012, no. 3, pp. 20–22. (In Russ.).
5. Gavrilov P., Ivanov V. Analysis of rail profile 610 E1 joints welded by means of mobile rail welding machine. *Proceedings of the Int. Sci. Conf. "Engineering for Rural Development"*. 2018, vol. 17, pp. 1969–1977. <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N021>
6. Rezanov V.A. Method of investigation of temperature changes at different distances from joints during rail welding. *Vestnik VNIIZhT*. 2011, no. 4, pp. 40–43. (In Russ.).
7. Karpachevskii V.V., Novakovich M.V., Zalavskii V.N. On welding of rail lashes at low temperatures with simultaneous restoration of their fixing temperature using heating. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*. 2016, no. 4, pp. 30–32. (In Russ.).
8. Gong L., Zhu L., Zhou H.X. Effect on hardness and microstructures of rail joint with ultra-narrow gap arc welding by post weld heat treatment. *Key Engineering Materials*. 2017, vol. 737, pp. 90–94. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.737.90>
9. Gladkov E.A. *Control of Processes and Equipment during Welding*. Moscow: Akademiya, 2006, 432 p. (In Russ.).
10. Voronin N.N., Seydakhmetov N.B., Rezanov V.A. The influence of technological parameters on the thermal cycle at butt flash welding of rails. *Welding International*. 2019, vol. 33, no. 7–9, pp. 328–334. <https://doi.org/10.1080/09507116.2021.1881346>
11. Mutton P., Cookson J., Qiu C., Welsby D. Microstructural characterisation of rolling contact fatigue damage in flashbutt welds. *Wear*. 2016, vol. 366–367, pp. 368–377. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.020>
12. Tawfik D.P., Mutton P.J., Chiu W.K. Experimental and numerical investigations: Alleviating tensile residual stresses in flash-butt welds by localised rapid post-weld heat treatment. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008, vol. 196, no. 1–3, pp. 279–291. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.05.055>
13. Voronin N.N., Seydakhmetov N.B., Rezanov V.A. Development of the combined flashing method in welding of rails. *Welding International*. 2017, vol. 31, no. 12, pp. 984–987. <https://doi.org/10.1080/09507116.2017.1369066>
14. Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Kryukov R.E., Usol'tsev A.A. Development of a new technology of welding of high speed movement rails. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2018, no. 8 (1424), pp. 50–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2018-8-50-57>
15. Polevoi E.V., Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Kushev D.Yu., Yunusov A.M. Investigation of non-metallic inclusions formed during electric contact welding of rail steel. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2019, no. 1 (27), pp. 8–12. (In Russ.).
16. Kozyrev N.A., Shevchenko R.A., Usol'tsev A.A., Kryukov R.E., Mikhno A.R. Study of wear resistance of railway rails welded joint. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2020, vol. 76, no. 8, pp. 818–825. (In Russ.). <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2020-8-818-825>
17. Sobolev A.A., Tazikov E.B., Zhukov D.A. Application of Elektro-Thermit technology for rail welding in Russia. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii*. 2004, no. 3, pp. 89–91. (In Russ.).

18. Gavrilov P., Ivanov V. Research of weldability of rail profile 60 E1 manufactured in factory “Arcelor Mittal”. In: *Transport Means – Proceedings of the 23rd Int. Sci. Conf.*, Palanga, 2–4 October 2019. Palanga: Kaunas University of Technology, 2019. P. 945–949.
19. Gavrilov P., Ivanov V. Study of exothermic welded joint grinding by “speno” rail grinders. In: *Proceedings of the 18th Int. Sci. Conf. “Engineering for Rural Development”*, Jelgava, May 22–24, 2019. Jelgava: 2019. P. 1013–1021.
<https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N132>
20. Kuchuk-Yatsenko S.I., Shvets Y.V., Didkovskii A.V., Chvertko P.N., Shverts V.O., Mikitin Ya.I. Technology and equipment for resistance flash welding of railway crossings with rail ends through an austenitic insert // *Welding International*. 2008. Vol. 22. No. 5. P. 338–341. <https://doi.org/10.1080/09507110802205365>
18. Gavrilov P., Ivanov V. Research of weldability of rail profile 60 E1 manufactured in factory “Arcelor Mittal”. In: *Transport Means – Proceedings of the 23rd Int. Sci. Conf.*, Palanga, October 2–4, 2019. Palanga: Kaunas University of Technology, 2019, pp. 945–949.
19. Gavrilov P., Ivanov V. Study of exothermic welded joint grinding by “speno” rail grinders. In: *Proceedings of the 18th Int. Sci. Conf. “Engineering for Rural Development”*, Jelgava, May 22–24, 2019. Jelgava: 2019, pp. 1013–1021.
<https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N132>
20. Kuchuk-Yatsenko S.I., Shvets Y.V., Didkovskii A.V., Chvertko P.N., Shverts V.O., Mikitin Ya.I. Technology and equipment for resistance flash welding of railway crossings with rail ends through an austenitic insert. *Welding International*. 2008, vol. 22, no. 5, pp. 338–341.
<https://doi.org/10.1080/09507110802205365>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Николай Анатольевич Козырев, д.т.н., профессор, заместитель директора научного центра качественных сталей, Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина
ORCID: 0000-0002-7391-6816
E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.ru

Людмила Петровна Бащенко, к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0003-1878-909X
E-mail: luda.baschenko@gmail.com

Роман Алексеевич Шевченко, к.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: shefn1200@mail.ru

Алексей Романович Михно, аспирант института машиностроения и транспорта, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-7305-6692
E-mail: mikno-mm131@mail.ru

Nikolai A. Kozyrev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Deputy Director of the Scientific Center for High-Quality Steels, I.P. Bardin Central Research Institute of Ferrous Metallurgy
ORCID: 0000-0002-7391-6816
E-mail: kozyrev_na@mtsp.sibsiu.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

Roman A. Shevchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
E-mail: shefn1200@mail.ru

Aleksei R. Mikhno, Postgraduate of the Institute of Mechanical Engineering and Transport, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-7305-6692
E-mail: mikno-mm131@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Н. А. Козырев – формирование основной идеи исследований, разработка методологии работы, анализ результатов исследований, подготовка материалов для статьи.
Л. П. Бащенко – подбор и анализ источников информации, анализ результатов исследований, подготовка материалов для статьи.
Р. А. Шевченко – определение целей и задач, подбор и анализ источников информации по теме процессов.
А. Р. Михно – проведение сварки и сбор статистических данных, подготовка материалов для статьи.

N. A. Kozyrev – formation of the main idea of research, development of the work methodology, analysis of the research results, preparation of materials for the article.
L. P. Bashchenko – selection and analysis of information sources, analysis of the research results, preparation of materials for the article.
R. A. Shevchenko – formation of goals and objectives, selection and analysis of information sources on the processes.
A. R. Mikhno – welding and statistical data collection, preparation of materials for the article.

Поступила в редакцию 24.02.2022
 После доработки 15.06.2022
 Принята к публикации 16.06.2022

Received 13.03.2018
 Revised 15.06.2022
 Accepted 16.06.2022



Оригинальная статья

УДК 621.762:669.018

DOI 10.17073/0368-0797-2022-7-494-503

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2343>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА СКОРОСТЬ АЗОТИРОВАНИЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСПЫЛЕНИЯ

В. Д. Католиков^{1,2}, А. Е. Семин³, О. А. Комолова^{1,4},
И. А. Логачев¹, Р. Е. Бочерилов¹, В. А. Лакиза¹

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

² ООО «НПФ «КОМТЕРМ» (Россия, 115088, Москва, Шарикоподшипниковская ул., 4)

³ Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова, филиал НИТУ МИСиС (Россия, 309516, Белгородская обл., Старый Оскол, микрорайон Макаренко, 42)

⁴ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН (Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 49)

Аннотация. Повышение эксплуатационных свойств металла обеспечивается введением в него определенного набора и количества легирующих элементов. К таким элементам относится и азот, интерес к которому постоянно растет. В публикациях отмечено, что азотирование газообразным азотом используется, в том числе, при плазменно-дуговом переплаве, приводятся данные легирования металла азотом на стадии получения гранул и порошков. В данной работе исследован процесс азотирования при получении металлических микрогранул из сплава марки ЭП741НП методом плазменного центробежного распыления. Металлические порошки получают путем оплавления торца вращающейся заготовки потоком ионизированного газа (смеси газов). Технология позволяет получать легированные азотом мелкодисперсные металлические порошки многокомпонентных сплавов сферической формы с минимальным количеством сателлитов, не отличающихся по размеру и химическому составу. Исследование скорости азотирования представляет большой интерес, особенно при получении порошкового металла. Одними из параметров, влияющих на степень насыщения металла азотом, являются время нахождения жидкого расплава под азотсодержащей плазмой и время кристаллизации металлической капли. В работе приведена методика, позволяющая дать количественную оценку роли данных параметров на поглощение азота металлом при получении порошка. Известно, что на кинетические параметры процесса азотирования определяющее влияние оказывает площадь контакта двух фаз металл – газ. В случае получения порошка, этот параметр зависит от размера поршинки. В связи с этим, в работе приведена методика расчета, позволяющая оценить средний фракционный состав металлопорошков в зависимости от ряда технологических факторов. Проведено сравнение полученных значений с данными полупромышленных плавок. Показано, что фракционный состав микрогранул зависит от скорости вращения и диаметра переплавляемой заготовки, плотности сплава и силе поверхностного натяжения. Установлено, что при увеличении частоты вращения расходуемого электрода можно добиться уменьшения величины дисперсности металлических порошков.

Ключевые слова: плазменное центробежное распыление, азот в сплавах, металлический порошок, плазма, азотирование

Для цитирования: Католиков В.Д., Семин А.Е., Комолова О.А., Логачев И.А., Бочерилов Р.Е., Лакиза В.А. Исследование влияния технологических параметров на скорость азотирования при получении металлических порошков методом плазменного центробежного распыления // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 7. С. 494–503. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-494-503>

Original article

EFFECT OF PROCESS PARAMETERS ON NITRIDING RATE IN OBTAINING POWDER METAL BY PLASMA CENTRIFUGAL ATOMIZATION

V. D. Katolnikov^{1,2}, A. E. Semin³, O. A. Komolova^{1,4},
I. A. Logachev¹, R. E. Bocherikov¹, V. A. Lakiza¹

¹ National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

² LLC “RPC KOMTERM” (4 Sharikopodshpnikovskaya Str., Moscow 115088, Russian Federation)

³ Ugarov Stary Oskol Technological Institute of National University of Science and Technology “MISIS” (42 Makarenko District, Stary Oskol, Belgorod Region 309516, Russian Federation)

⁴ Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences (49 Leninskii Ave., Moscow 119991, Russian Federation)

Abstract. The improved performance properties of metals are ensured by introducing into them certain set and amount of alloying elements. Nitrogen, which is an area of growing interest, is one such element. Publications show that nitriding with gaseous nitrogen is also used for plasma-arc remelting. They provide data on metal alloying with nitrogen at the granules and powders production stage. This paper studies the process of nitriding in obtaining metal microgranules from EP741NP alloy by means of plasma centrifugal atomization. Metal powders are obtained by melting the end face of a rotating workpiece with a stream of ionized gas (gas mixture). The technology allows for nitrogen-alloyed fine metal powders of multicomponent alloys of spherical shape with a minimum number of satellites, which do not differ in size or chemical composition, to be obtained. The study of the nitriding rate is of great interest, especially in production of powder metal. One parameter which affects the degree of metal saturation with nitrogen is the residence time of the liquid melt under the nitrogen-containing plasma, and the crystallization time of a metal droplet. This paper presents a methodology which allows quantification of the role of these parameters on the absorption of nitrogen by the metal in obtaining powder. The kinetic parameters of the nitriding process are influenced by the interface area of two metal – gas phases. In the case of obtaining powder, this parameter depends on the size of the powder particle. In this regard, this paper presents a calculation method which allows the average fractional composition of metal powders to be estimated depending on a number of process factors. The values obtained are compared with the data of semi-industrial melting. It is demonstrated that the fractional composition of microgranules depends on the rotation speed and diameter of the workpiece to be remelted, as well as the alloy density and the surface tension force. It has been established that by increasing the rotation speed of the consumable electrode it is possible to achieve a decrease in the dispersiveness of metal powders.

Keywords: plasma centrifugal atomization, nitrogen in alloys, metal powder, plasma, nitriding

For citation: Katolikov V.D., Semin A.E., Komolova O.A., Logachev I.A., Bocherikov R.E., Lakiza V.A. Effect of process parameters on nitriding rate in obtaining powder metal by plasma centrifugal atomization. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 7, pp. 495–503. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-494-503>

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день металлические порошки активно используются в качестве основного сырья для аддитивных технологий [1, 2], а изделия из них нашли широкое применение в различных отраслях: электроэнергетике, авиастроении, автомобилестроении, здравоохранении и др. [3]. Служебные свойства стали во многом определяются наличием в ней определенного набора и количества легирующих элементов, к ним относятся и азот. Влияние азота, как легирующего элемента, на служебные свойства доказано многими работами. Это также относится и к порошковому металлу, поэтому получение порошкового металла, легированного азотом, уже на стадии его производства весьма актуально.

В работах [4, 5] дана оценка ряда термодинамических параметров, оказывающих влияние на процесс азотирования порошка при плазменном распылении вращающейся заготовки. Отмечено, что содержание азота в полученных порошках весьма далеко от термодинамически обоснованных концентраций. В работе основной упор сделан на кинетику данного процесса. В ней приведены расчетные показатели по размеру капель – будущих порошинок, времени контакта жидкого расплава с плазмой, содержащей азот, и ряд других параметров.

В качестве основного фактора быстрого развития процессов послойного напыления можно выделить гибкость процесса, возможность производства изделий различной геометрической формы, широкий спектр металлических материалов, однородность химического состава и микроструктуры изделия. В связи с высоким спросом на изделия, изготавливаемые методами аддитивных технологий, к производству металлопорошков предъявляются особые требования с целью повышения эксплуатационных свойств конечной продукции. Детали, изготовленные методами порошковой металлур-

гии, характеризуются лучшими физико-механическими свойствами по сравнению с литыми [6].

Наиболее известными и широко распространенными методами получения металлических порошков являются [7, 8]:

- распыление металлической струи газовым потоком [9, 10];
- распыление металлической струи потоком воды [11, 12];
- плазменное центробежное распыление [13].

Как показывает практика и ряд работ, наиболее перспективным методом получения металлических гранул является плазменное центробежное распыление заготовки. Данный метод обладает рядом преимуществ, в частности применяемый механизм формирования жидкой капли и ее последующая кристаллизация в атмосфере инертного газа создают условия формирования плотной структуры с минимальным количеством сателлитов. Кроме того, высокая скорость кристаллизации исключает возможность контакта жидкого расплава с иными материалами, например, футеровкой. При этом в качестве плазмообразующего газа можно использовать и азот в смеси с аргоном. Данный способ представляет интерес как для получения чистых металлов и сплавов в виде порошка, так и для легирования получаемых металлических порошков азотом [14 – 18].

Авторами работы [4] были представлены данные полупромышленных плавок с получением азотсодержащих металлических порошков сплава марки ЭП741НП методом плазменного центробежного распыления. Производство гранул данным методом заключается в расплавлении торца вращающейся оплавленной заготовки плазмой, состоящей из смеси плазмообразующих газов. Под действием плазмы металлическая заготовка оплавляется, и за счет центробежных сил жидкий металл перемещается от центральной оси заготовки к периферийной части, образуя венец. Преодолевая силы

поверхностного натяжения, капли металла отрываются от заготовки, приобретая в полете сферическую форму, и кристаллизуются. При этом изменение технологических параметров, таких как скорость вращения расходуемого электрода, диаметр заготовки, мощность плазменной установки, могут оказывать значительное влияние на гранулометрический состав металлических порошков и скорость азотирования. Например, при получении металлических порошков из сплавов Ti-6Al-4V, 316-steel, Co-29Cr-6Mo методом плазменного центробежного распыления, авторы работы [19] отмечают, что фракционный состав металлических гранул обратно пропорционален квадратному корню из скорости вращения расходуемого электрода. В работах [20 – 24] отражено влияние скорости вращения заготовки, скорости переплава и диаметра переплавляемого электрода на размер получаемого металлопорошка.

Процесс насыщения металла азотом на установке плазменного центробежного распыления зависит от кинетических и термодинамических параметров. Вследствие высокой скорости вращения расходуемой заготовки, время нахождения жидкого расплава под азотсодержащей плазменной дугой ограничено, в отличие от традиционного плазменно-дугового переплава, а получаемые микрогранулы обладают высокой скоростью кристаллизации. Для оценки растворимости азота необходимо рассмотреть ряд технологических параметров, влияющих на размер металлических порошков, время нахождения жидкого расплава под столбом плазмы и время кристаллизации гранул [5].

Для анализа и исследования вышеописанных параметров и зависимостей, авторы данной работы воспользовались информацией, приведенной ранее [4].

При передаче тепла плазменной дугой заготовке начинается процесс расплавления металла, на торце электрода образуется некоторый объем жидкого металла. Образовавшийся жидкий металл под воздействием центробежных сил перемещается от центральной оси к периферийной части вращающегося электрода. В момент, когда центробежные силы превышают силы поверхностного натяжения, происходит отрыв капли, при этом в момент отрыва между каплей и заготовкой образуется тонкий «мост». Необходимо отметить, что на каплю металла, помимо вышеприведенных, действуют и другие силы, например, силы тяжести, гравитационные силы, сила давления плазменной дуги и др. Однако влияние данных физических параметров на удержание жидкого металла на заготовке или отрыв капли от нее весьма мало [25].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Получение азотсодержащих металлических гранул осуществляли на промышленной установке плазмен-

ного центробежного распыления, оснащенной механизмом вращения расходуемой заготовки, камерой распыления, источником нагрева – плазмотроном, бункером для сбора гранул и системой водяного охлаждения.

Модельным сплавом, для которого проводилось исследование получения азотированного металлического порошка, являлся никелевый жаропрочный сплав ЭП741НП ГОСТ 52802-2007.

Переплавляемый электрод, полученный в вакуумной индукционной печи (ВИП), массой порядка 20 000 г помещался и закреплялся на установке плазменного центробежного распыления. Далее закрывался корпус печи и откачивалось давление до 10^{-3} мм.рт.ст., после чего камера печи наполнялась инертным газом – аргоном. Давление смеси рабочих газов (аргон, азот, гелий) в плазмотроне составляло 1,2 атм. Рабочий ток плазматрона 1,05 кА, напряжение плазматрона 90 В, зазор между плазмотроном и заготовкой 30 – 40 мм. Частота вращения заготовки для первой серии экспериментов была задана 15 000 об/мин, для второй серии – 20 000 об/мин. Диаметр заготовки 75 мм, длина 670 мм, время переплава составляло порядка 20 мин. Содержание азота в смеси плазмообразующего газа менялось и составляло 15 и 20 %.

ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ПРЕБЫВАНИЯ ЖИДКОГО РАСПЛАВА ПОД ПЛАЗМЕННОЙ ДУГОЙ

Экспериментально определить время нахождения жидкого металла под плазмой в процессе нагрева, оплавления и распыления электрода, а также кристаллизации представляется весьма затруднительно. В частности, для нахождения времени пребывания жидкого металла под потоком плазмы и времени кристаллизации жидкой гранулы, удобно использовать методы математического моделирования, сделав ряд следующих допущений:

- анодное пятно находится строго по центру торца расходуемого электрода;
- нагрев и расплавление заготовки осуществляются за счет тепла, выделяемого плазменной дугой;
- насыщение металла азотом происходит только под столбом плазмы;
- из-за высокой скорости кристаллизации металлического порошка и условий проведения плавки в атмосфере смеси инертных газов и азота десорбция азота не протекает.

Провести оценку времени нахождения жидкого металла от момента расплавления до отрыва капли от торца заготовки можно, основываясь на массовой скорости плавления установки. Полученное время примем за время нахождения металла под плазмой. Для анализа данного параметра оценим массовую скорость плавления, т. е. массу расплавленного металла в единицу времени.

Массовая скорость переплава:

$$v_{\text{пл}} = \frac{m_{\text{спл}}}{t_{\text{пл}}}, \quad (1)$$

где $m_{\text{спл}}$ – масса переплавляемой заготовки, г; $t_{\text{пл}}$ – время переплава заготовки, с.

Сделаем предположение, что толщина жидкой пленки на торце электрода равна среднему диаметру гранул полученного металлического порошка. Тогда можно оценить мгновенный объем жидкого металла на торце электрода. Площадь торца переплавляемого электрода найдем по формуле

$$S = \pi r^2. \quad (2)$$

Объем жидкого металла, находящийся на торце заготовки:

$$V = Sd, \quad (3)$$

где S – площадь торца переплавляемого электрода, м²; d – диаметр образовавшейся порошинки, м.

Тогда время пребывания жидкого металла под плазмой, учитывая массовую скорость переплава, составит:

$$\tau = \frac{m_{\text{ж. Me}}}{v_{\text{пл}}}, \quad (4)$$

где $m_{\text{ж. Me}}$ – масса жидкого металла на торце электрода, г.

Используя приведенную выше методику, оценили время пребывания жидкого металла под азотсодержащей плазмой. Результаты представлены ниже.

Параметр	Значение
Массовая скорость переплава, v , г/см	16,898
Площадь торца электрода, S , м ²	$4,415 \cdot 10^{-3}$
Объем металла на торце электрода, V , м ³	$6,62 \cdot 10^{-7}$
Масса жидкого металла на торце, $m_{\text{ж. Me}}$, г	5,53
Время пребывания жидкого металла под плазмой, τ , с	0,327

Если принять, что лимитирующей стадией является конвективная диффузия атомов азота в расплаве, то уравнение скорости азотирования можно записать:

$$\frac{d[N]}{d[\tau]} = \alpha([N]_p - [N]). \quad (5)$$

Проинтегрировав вышеприведенное уравнение, получим:

$$\ln \frac{[N]_p - [N]_0}{[N]_p - [N]} = \alpha t, \quad (6)$$

где $\alpha = \frac{\alpha' S}{V}$ – константа скорости массопереноса, см/с;

α' – полуэмпирический параметр, определяющий скорость массопереноса; S – площадь межфазной поверхности, м²; V – объем металлической капли, м³; $[N]_p$ – концентрация азота в поверхностном слое границы металл – газ, близкая к равновесию с газовой фазой, %; $[N]$ – концентрация азота в объеме металла в момент времени τ , %; $[N]_0$ – начальная концентрация азота в объеме металла, %; τ – время насыщения металла азотом, с.

Используя данные полупромышленных плавок и расчетные данные, полученные с помощью описанной методики, оценили скорость азотирования металла в процессе распыления расходуемого электрода азотсодержащей плазмой.

На рис. 1 приведена зависимость скорости азотирования от парциального давления азота в плазмообразующем газе. Показано, что увеличение давления азота способствует повышению скорости азотирования.

Однако возрастающим график будет не постоянно, при достижении некоторой концентрации азота в расплаве скорость азотирования перестает зависеть от содержания азота. Необходимо отметить, что расчетные данные превышают экспериментальные. Такое различие можно объяснить, тем, что в работе для построения математической модели для оценки времени нахождения металла под плазмой и скорости кристаллизации был сделан ряд допущений.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ЖИДКОЙ КАПЛИ

Линейную скорость истечения расплава можно определить из уравнения

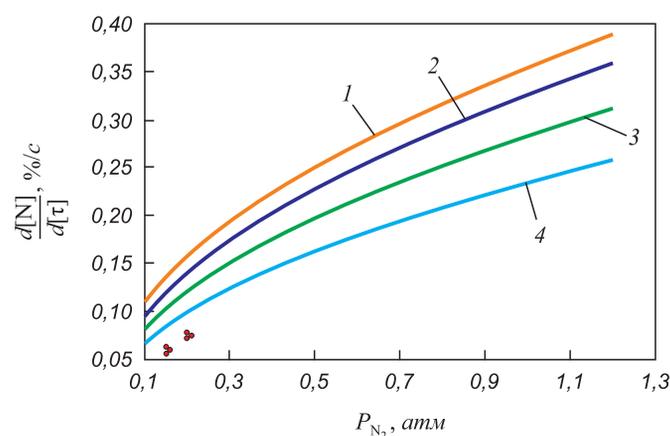


Рис. 1. Зависимость скорости азотирования от парциального давления азота в плазмообразующем газе. Точки – экспериментальные данные, линии – расчетные данные при различных значениях α' : 1 – $5,2 \cdot 10^{-5}$; 2 – $4,9 \cdot 10^{-5}$; 3 – $4,3 \cdot 10^{-5}$; 4 – $3,5 \cdot 10^{-5}$

Fig. 1. Dependence of nitriding rate on partial pressure of nitrogen in plasma gas. Points – experimental data, lines – data calculated at various values of α' : 1 – $5.2 \cdot 10^{-5}$; 2 – $4.9 \cdot 10^{-5}$; 3 – $4.3 \cdot 10^{-5}$; 4 – $3.5 \cdot 10^{-5}$

$$V = \omega R, \quad (7)$$

где $\omega = 2\pi n$ – угловая скорость вращения заготовки, об/мин; n – частота вращения заготовки, об/мин; R – радиус заготовки, м.

Рассчитаем объем капли:

$$V' = \frac{4}{3}\pi r^3, \quad (8)$$

где r – радиус капли, м.

Найдем массу жидкой капли:

$$m = V'\rho, \quad (9)$$

где ρ – плотность сплава, кг/м³.

Время нахождения капли в жидком состоянии от момента отрыва до полной кристаллизации можно найти из уравнения

$$\tau = \frac{C_p m_k}{\alpha S_k} \ln \frac{T_n - T_0}{T_{пл} - T_0}, \quad (10)$$

где C_p – удельная теплоемкость расплава, примем ее равной удельной теплоемкости никеля (500 Дж/(кг·К)); $S_k = \pi d^2$ – удельная площадь поверхности капли жидкого металла, м²; T_n – температура капли в момент отрыва от электрода, принимаем равной температуре плавления сплава + 200 градусов перегрева (1860 К); T_0 – температура полностью закристаллизовавшейся капли, примем равной 300 К; $T_{пл}$ – температура плавления сплава (1660 К); α – коэффициент теплообмена между каплей и окружающей атмосферой, Вт/(м²·К);

Коэффициент теплообмена можно найти из уравнения вынужденного конвективного теплообмена [26]

$$\alpha = \frac{Nu \lambda_e}{d_k}, \quad (11)$$

где d_k – диаметр капли, м; λ_e – коэффициент теплопроводности газовой среды, Вт/(м·К), для аргона согласно данным [27] λ_e найдем из уравнения

$$\lambda_e = (4,923 + 0,0465T - 8,028 \cdot 10^{-6} T^2) \cdot 10^{-3}; \quad (12)$$

Nu – критерий Нуссельта

$$Nu = 0,62\sqrt{Re}; \quad (13)$$

Re – число Рейнольдса

$$Re = \frac{V d_k}{\nu}; \quad (14)$$

ν – коэффициент кинематической вязкости аргона, см²/с [27].

Подставив в уравнение (10) все коэффициенты, найденные по уравнениям (11) – (14), оценили время кристаллизации металлической порошинки. Результаты расчетов представлены ниже.

Параметр	Значение
Плотность сплава, ρ , кг/м ³	8350
Скорость истечения расплава, V , м/с	58,875
Объем капли, V' , м ³	$2,679 \cdot 10^{-13}$
Масса капли, m , кг	$2,237 \cdot 10^{-9}$
Площадь поверхности капли, S_k , м ²	$2,0096 \cdot 10^{-8}$
Коэффициент теплообмена, α , Вт/(м ² ·К)	2818,954
Критерий Нуссельта, Nu	10,637
Число Рейнольдса, Re	294,375
Время кристаллизации, τ , с	$2,696 \cdot 10^{-3}$

АНАЛИЗ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРОШКА

Определить размер гранул можно, рассмотрев влияние основных технологических параметров на механизм формирования капли. Основной вклад в процесс отделения жидкой частицы от венца вносит сила центробежного ускорения, зависящая от скорости вращения и диаметра расходуемой заготовки. Противодействующей ей является сила поверхностного натяжения, величина которой зависит от плотности и коэффициента поверхностного натяжения сплава, находящегося в жидком состоянии. Исходя из этого и согласно данным, приведенным в работах [22, 25, 28], можно воспользоваться формулой, позволяющей рассчитывать центробежную силу:

$$F_{ц} = \frac{\pi d^3 \rho \omega^2 D}{12}, \quad (15)$$

где d – диаметр жидкой капли, м; D – диаметр расходуемого электрода, м; $\omega = 2\pi n$ – угловая скорость вращения расходуемого электрода рад/с; n – частота вращения, об/с; η – коэффициент отрыва; σ – коэффициент поверхностного натяжения расплава, Н/м; ρ – плотность сплава, кг/м³.

Силу поверхностно натяжения можно рассчитать по формуле

$$F_{п.н.} = \sigma d_1, \quad (16)$$

где d_1 – диаметр видимого «моста» между заготовкой и каплей металла в момент ее отрыва, м,

$$d_1 = \eta d, \quad (17)$$

где η – коэффициент отрыва, согласно литературным данным [26, 29] принимаем равным 0,85.

Оценить предположительный диаметр жидкой капли можно, исходя из равенства центробежной силы и поверхностного натяжения:

$$d = \frac{2\sqrt{3\eta}}{\omega} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho D}}. \quad (18)$$

Когда капля металла отрывается, она может иметь произвольную форму. Однако из-за высокой скорости вращения заготовки, в процессе полета под действием сил поверхностного натяжения металла происходит глобуляризация и кристаллизация капли металла.

Используя экспериментальные данные о скорости вращения, массе и геометрических размерах переплавленного электрода, по приведенной выше методике провели оценку среднего размера образующихся металлопорошков. Результаты представлены на рис. 2.

Дисперсность полученных металлических порошков определяется следующими основными параметрами:

- центробежной силой, определяемой частотой вращения электрода и его диаметром;
- силой поверхностного натяжения, зависящей от коэффициента поверхностного натяжения сплава и температуры.

Результаты расчетов условно согласуются с данными, полученными в ходе проведения полупромышленных испытаний на установке плазменного центробежного распыления. Отличие данных обусловлено отсутствием в расчетах всех сил, влияющих на размер капли, а также невозможностью точно оценить все физические параметры, используемые в расчетах. Однако расчетные и экспериментальные данные показывают, что при сохранении диаметра расходуемой заготовки, марки сплава, а, следовательно, плотности,

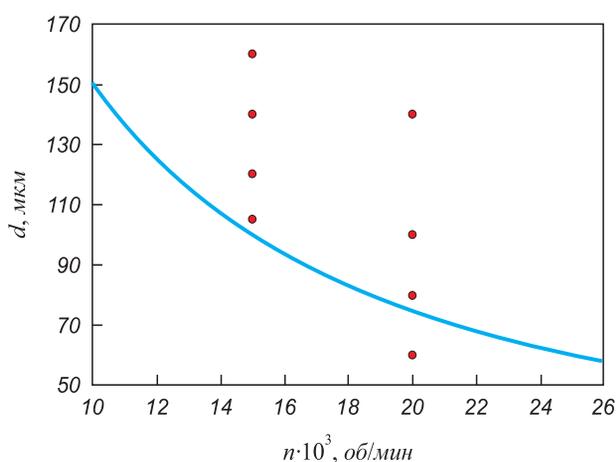


Рис. 2. Зависимость диаметра гранул от скорости вращения заготовки. Точки – экспериментальные данные, линия – расчетные данные

Fig. 2. Dependence of the granules diameter on rotation speed of the workpiece. Points – experimental data, line – calculated data

вязкости и коэффициента поверхностного натяжения, ключевым параметром остается частота вращения электрода.

Согласно уравнениям (5) и (6), одним из параметров, оказывающих влияние на скорость процесса азотирования, является константа скорости массопереноса. На величину значения константы скорости массопереноса оказывает влияние площадь поверхности порошинки, т. е. площадь контакта жидкого металла с газовой фазой и объем образующейся микрогранулы. Два приведенных параметра зависят от диаметра образующейся микрогранулы. Как было показано выше, на размер диаметра порошинки можно оказывать влияние путем изменения скорости вращения заготовки. Из этого следует, что скорость вращения заготовки влияет на конечную концентрацию азота в порошинке.

На рис. 3 приведена расчетная зависимость содержания азота в микрогрануле от отношения поверхности взаимодействия металл – газ к объему микрогранулы. Увеличение скорости вращения заготовки дает возможность получать порошки меньшего диаметра, что в свою очередь увеличивает отношение площади поверхности взаимодействия металл – газ к объему микрогранулы.

Представленные на рис. 3 данные позволяют говорить о том, что при уменьшении размера металлических гранул можно добиться повышения концентрации азота. Однако необходимо отметить, что постоянное увеличение скорости вращения заготовки, тем самым получение более мелкодисперсных гранул, приведет

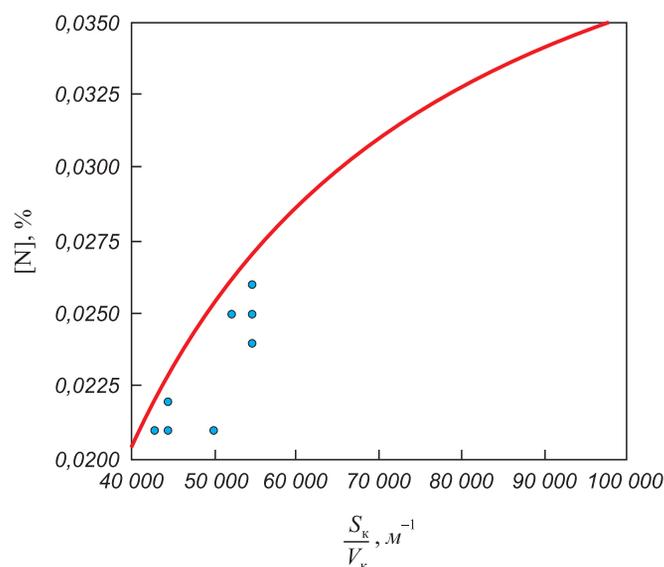


Рис. 3. Зависимость содержания азота от отношения поверхности взаимодействия металл – газ к объему микрогранулы. Точки – экспериментальные данные, линия – расчетные данные

Fig. 3. Dependence of nitrogen content on the ratio of metal – gas interaction surface to the microgranule volume. Points – experimental data, line – calculated data

к невозможности процесса азотирования из-за малой площади поверхности контакта металл – газ и высокой скорости кристаллизации.

Выводы

В работе исследовано влияние на процесс азотирования металла при производстве металлических порошков методом плазменного центробежного распыления ряда кинетических параметров, а именно времени контакта азотсодержащей плазмы с жидкой фазой, времени кристаллизации образующихся микрогранул, скорости вращения переплавляемой заготовки и размера получаемых порошинок-гранул.

Получена зависимость скорости азотирования металлопорошков от парциального давления азота в плазмообразующем газе. Например, при парциальном давлении азота, равного 0,15 атм., скорость азотирования может составлять 0,08 – 0,14 %/с в зависимости от α' (принятого параметра, определяющего скорость массопереноса). Приведенная зависимость показывает, что повышение парциального давления в плазмообразующем газе способствует повышению скорости азотирования. Показана количественная зависимость

между технологическими параметрами и показателями, характеризующими процесс насыщения металла азотом.

Приведена методика расчета, позволяющая прогнозировать средний размер металлических порошков, полученных методом плазменного центробежного распыления, в зависимости от ряда технологических показателей установки. Показано, что на установке плазменного центробежного распыления возможна регулировка размера гранул путем изменения частоты вращения переплавляемого электрода. Рассчитанные в работе данные показывают, что повышение числа оборотов с 15 000 до 20 000 об/мин позволяет уменьшить средний диаметр микрогранул на 25 мкм. Справедливость приведенных зависимостей, установленных математическим путем, подтверждена экспериментальными данными.

Полученные зависимости могут позволить рекомендовать режим азотирования металла на стадии получения порошка методом плазменного центробежного распыления, в том числе за счет изменения парциального давления азота в смеси плазмообразующих газов, скорости распыления и связанным с ней фракционным составом гранул.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Зенина М.В. Производство металлических порошков (гранул) для сырьевого обеспечения аддитивных технологий в машиностроении // *Технология легких сплавов*. 2015. № 3. С. 32–38.
2. Hsu T.-I, Wei C.-M., Wu L.-D., Li Y.-P., Chiba A., Tsai M.-H. Nitinol powders generate from plasma rotation electrode process provide clean powder for biomedical devices used with suitable size, spheroid surface and pure composition // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. No. 1. Article 13776. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32101-1>
3. Uriondo A., Miguez M.E., Perinpanayagam S. The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2015. Vol. 229. No 11. P. 2132–2147. <https://doi.org/10.1177/0954410014568797>
4. Католиков В.Д., Логачев И.А., Комолова О.А., Железный М.В., Семин А.Е. Процесс азотирования при получении порошка и исследование структуры сплава ЭП741НП, легированного азотом // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2021. Том 64. № 1. С. 59–67. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-1-59-67>
5. Католиков В.Д., Логачев И.А., Шукина Л.Е., Семин А.Е. Термодинамика растворимости азота в сплавах на базе никеля в условиях плазменно-дугового переплава // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2020. Том 63. № 3–4. С. 231–237. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-3-4-231-237>
6. Shen J., Chen B., Umeda J., Kondoh K. Advanced mechanical properties of a powder metallurgy Ti-Al-N alloy doped with ultrahigh nitrogen concentration // *JOM*. 2018. No. 70. P. 626–631. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-2780-9>
7. Порошковая металлургия сталей и сплавов / Ж.И. Дзnelадзе, Р.П. Щеголева, Л.С. Голубева, Е.М. Рабинович, Б.А. Борок. Москва: Металлургия, 1978. 274 с.
8. Порошковая металлургия и напыленные покрытия: Учебник для вузов / В.Н. Анциферов, Г.В. Бобров, Л.К. Дружинин, С.С. Кипарисов, В.И. Костиков, А.В. Крупин, В.В. Кудинов, 1. Zenina M.V. Production of metal powders (granules) for raw materials supply to additive technologies in mechanical engineering. *Tekhnologiya legkikh splavov*. 2015, no. 3, pp. 32–38. (In Russ.).
2. Hsu T.-I, Wei C.-M., Wu L.-D., Li Y.-P., Chiba A., Tsai M.-H. Nitinol powders generate from plasma rotation electrode process provide clean powder for biomedical devices used with suitable size, spheroid surface and pure composition. *Scientific Reports*. 2018, vol. 8, no. 1, article 13776. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32101-1>
3. Uriondo A., Miguez M.E., Perinpanayagam S. The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2015, vol. 229, no. 11, pp. 2132–2147. <https://doi.org/10.1177/0954410014568797>
4. Katolikov V.D., Logachev I.A., Komolova O.A., Zheleznyi M.V., Semin A.E. Nitriding during powder production and study of the structure of EP741NP alloy doped with nitrogen. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 1, pp. 59–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-1-59-67>
5. Katolikov V.D., Logachev I.A., Shchukina L.E., Semin A.E. Thermodynamics of nitrogen solubility in nickel-based alloys at plasma-arc remelting. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 3–4, pp. 231–237. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-3-4-231-237>
6. Shen J., Chen B., Umeda J., Kondoh K. Advanced mechanical properties of a powder metallurgy Ti-Al-N alloy doped with ultrahigh nitrogen concentration. *JOM*. 2018, no. 70, pp. 626–631. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-2780-9>
7. Dzneldadze Zh.I., Shchegoleva R.P., Golubeva L.S., Rabinovich E.M., Borok B.A. *Powder Metallurgy of Steels and Alloys*. Moscow: Metallurgiya, 1978, 274 p. (In Russ.).
8. Antsiferov V.N., Bobrov G.V., Druzhinin L.K., Kiparisov S.S., Kostikov V.I., Krupin A.V., Kudinov V.V., Libenson G.A., Mitin B.S., Roman O.V. *Powder Metallurgy and Sputter Coatings*.

- Г.А. Либенсон, Б.С. Митин, О.В. Роман. Москва: Metallurgiya, 1987. 792 с.
9. Lawley A. Atomization of specialty alloy powders // *JOM*. 1981. Vol. 33. No. 1. P. 13–18. <https://doi.org/10.1007/BF03354395>
 10. Entezarian M., Allaire F., Tsantrizos p., Drew R.A.L. Plasma atomization: A new process for the production of fine, spherical powders // *JOM*. 1996. Vol. 48. No. 6. P. 53–55. <https://doi.org/10.1007/BF03222969>
 11. Antony L.V.M., Reddy G.R. Processes for production of high-purity metal powders // *JOM*. 2003. Vol. 55. No. 3. P. 14–18. <https://doi.org/10.1007/s11837-003-0153-4>
 12. Sun P., Fang Z.Z., Zhang Y., Xia Y. Review of the methods for production of spherical Ti and Ti alloy powder // *JOM*. 2017. Vol. 69. No. 10. P. 1853–1860. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2513-5>
 13. Li Y., Song M., Zhang X., Zhang W., Li Yan, Zhang Y. Preparation of titanium alloy powder by plasma rotating electrode process // *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 993. P. 79–85. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.993.79>
 14. Zhang M.J., Li F.G., Wang S.Y., Liu C.Y. Effect of powder preparation technology on the hot deformation behavior of HIPed P/M nickel-base superalloy FGH96 // *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 528. No. 12. P. 4030–4039. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.01.118>
 15. Zdujic M., Uskokovic D. Production of atomized and alloy powders by the rotating electrode process // *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 1990. Vol. 29. P. 673–683. <https://doi.org/10.1007/BF00795571>
 16. Бутрим В.Н., Логачева А.И. Metallurgy of titanium alloy granules in JSC «Композит» // *Технология легких сплавов*. 2010. № 1. С. 187–190.
 17. Sinha O.P., Singh A.K., Ramachandra C., Gupta R.C. Plasma-melted nitrogen-bearing cast stainless steels - microstructure and tensile properties // *Metallurgical Transactions A*. 1992. Vol. 23. No. 12. P. 3317–3324. <https://doi.org/10.1007/BF03024539>
 18. Sinha O.P., Gupta R.C. Nitrogen absorption rate under plasma arc compared to resistance and induction melting // *ISIJ International*. 1994. Vol. 34. No. 3. P. 295–297. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.34.295>
 19. Nie Y., Tang J., Teng J., Ye X., Yang B., Huang J., Yu S., Li Y. Particle defects and related properties of metallic powders produced by plasma rotating electrode process // *Advanced Powder Technology*. 2020. Vol. 31. No. 7. P. 2912–2920. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.05.018>
 20. Tang J., Nie Y., Lei Q., Li Y. Characteristics and atomization behavior of Ti-6Al-4V powder produced by plasma rotating electrode process // *Advanced Powder Technology*. 2019. Vol. 30. No. 10. P. 2330–2337. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.07.015>
 21. Liu Y., Liang S., Han Z., Song J., Wang Q. A novel model of calculating particle in plasma rotating electrode process for superalloys // *Powder Technology*. 2018. Vol. 336. P. 406–414. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.06.002>
 22. Zhao Y., Numata H., Bian H., Wako K., Yamanaka K., Aoyagi K., Chiba A. Centrifugal granulation behavior in metallic powder fabrication by plasma rotating electrode process // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. No. 1. P. 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75503-w>
 23. Кошелев В.Я., Кузнецов В.А., Сухов Д.И. К вопросу о производстве гранул крупностью менее 200 мкм из титановых сплавов методом плазменной плавки и центробежного распыления литой заготовки // *Технология легких сплавов*. 2010. № 2. С. 44–48.
 24. Zou L., Liu X., Xie H., Mao X. High-quality Ti-6Al-4V alloy powder by plasma rotating electrode process and its processibility in hot *Textbook for universities*. Moscow: Metallurgiya, 1987, 792 p. (In Russ.).
 9. Lawley A. Atomization of specialty alloy powders. *JOM*. 1981, vol. 33, no. 1, pp. 13–18. <https://doi.org/10.1007/BF03354395>
 10. Entezarian M., Allaire F., Tsantrizos p., Drew R.A.L. Plasma atomization: A new process for the production of fine, spherical powders. *JOM*. 1996, vol. 48, no. 6, pp. 53–55. <https://doi.org/10.1007/BF03222969>
 11. Antony L.V.M., Reddy G.R. Processes for production of high-purity metal powders. *JOM*. 2003, vol. 55, no. 3, pp. 14–18. <https://doi.org/10.1007/s11837-003-0153-4>
 12. Sun P., Fang Z.Z., Zhang Y., Xia Y. Review of the methods for production of spherical Ti and Ti alloy powder. *JOM*. 2017, vol. 69, no. 10, pp. 1853–1860. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2513-5>
 13. Li Y., Song M., Zhang X., Zhang W., Li Yan, Zhang Y. Preparation of titanium alloy powder by plasma rotating electrode process. *Materials Science Forum*. 2020, vol. 993, pp. 79–85. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.993.79>
 14. Zhang M.J., Li F.G., Wang S.Y., Liu C.Y. Effect of powder preparation technology on the hot deformation behavior of HIPed P/M nickel-base superalloy FGH96. *Materials Science and Engineering: A*. 2011, vol. 528, no. 12, pp. 4030–4039. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.01.118>
 15. Zdujic M., Uskokovic D. Production of atomized and alloy powders by the rotating electrode process. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 1990, vol. 29, pp. 673–683. <https://doi.org/10.1007/BF00795571>
 16. Butrim V.N., Logacheva A.I. Metallurgy of titanium alloy granules in JSC “Composite”. *Tekhnologiya legkikh spлавov*. 2010, no. 1, pp. 187–190. (In Russ.).
 17. Sinha O.P., Singh A.K., Ramachandra C., Gupta R.C. Plasma-melted nitrogen-bearing cast stainless steels - microstructure and tensile properties. *Metallurgical Transactions A*. 1992, vol. 23, no. 12, pp. 3317–3324. <https://doi.org/10.1007/BF03024539>
 18. Sinha O.P., Gupta R.C. Nitrogen absorption rate under plasma arc compared to resistance and induction melting. *ISIJ International*. 1994, vol. 34, no. 3, pp. 295–297. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.34.295>
 19. Nie Y., Tang J., Teng J., Ye X., Yang B., Huang J., Yu S., Li Y. Particle defects and related properties of metallic powders produced by plasma rotating electrode process. *Advanced Powder Technology*. 2020, vol. 31, no. 7, pp. 2912–2920. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.05.018>
 20. Tang J., Nie Y., Lei Q., Li Y. Characteristics and atomization behavior of Ti-6Al-4V powder produced by plasma rotating electrode process. *Advanced Powder Technology*. 2019, vol. 30, no. 10, pp. 2330–2337. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.07.015>
 21. Liu Y., Liang S., Han Z., Song J., Wang Q. A novel model of calculating particle in plasma rotating electrode process for superalloys. *Powder Technology*. 2018, vol. 336, pp. 406–414. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.06.002>
 22. Zhao Y., Numata H., Bian H., Wako K., Yamanaka K., Aoyagi K., Chiba A. Centrifugal granulation behavior in metallic powder fabrication by plasma rotating electrode process. *Scientific Reports*. 2020, vol. 10, no. 1, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75503-w>
 23. Koshelev V.Ya., Kuznetsov V.A., Sukhov D.I. On production of granules with particle size of less than 200 microns from Ti alloys by plasma melting and centrifugal spraying of a cast billet. *Tekhnologiya legkikh spлавov*. 2010, no. 2, pp. 44–48. (In Russ.).
 24. Zou L., Liu X., Xie H., Mao X. High-quality Ti-6Al-4V alloy powder by plasma rotating electrode process and its processibility in hot

- isostatic pressing // *High Performance Structural Materials*. 2018. P. 61–67. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0104-9_8
25. Струков Н.Н., Белинин Д.С., Кучев П.С., Шицын Ю.Д. Регулирование размера частиц порошков при плазменном распылении пруткового материала // Вестник Пермского государственного технического университета. Машиностроение, материаловедение. 2011. Том 13. № 3. С. 117–121.
 26. Рудской А.И., Соколов Ю.А., Кобаев В.Н. Особенности моделирования процесса получения гранул методом PREP // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2015. № 1 (214). С. 123–129. <https://doi.org/10.5862/JEST.214.14>
 27. Государственная служба стандартных справочных данных в области использования атомной энергии. База данных по теплофизическим свойствам газов и их смесей, используемых в ЯЭУ. URL: <https://gsssd-rosatom.mephi.ru/DB-tp-02/Ar.php>
 28. Литвиненко А.И., Жудра А.П., Белый А.И. Анализ и кинетика процесса термоцентрифужного распыления слитков из плавящихся карбидов вольфрама // Современная электротехнология. 2013. № 2. С. 29–35.
 29. Сентюрина Ж.А. Получение сферических порошков из сплавов на основе алюминидов никеля NiAl для аддитивных технологий: Диссертация ... кандидата технических наук. Москва, 2016. 168 с.
 - isostatic pressing. *High Performance Structural Materials*. 2018, pp. 61–67. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0104-9_8
 25. Strukov N.N., Belinin D.S., Kuchev P.S., Shchitsyn Yu.D. Regulation of powders particles size during plasma spraying of bar material. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*. 2011, vol. 13, no. 3, pp. 117–121. (In Russ.).
 26. Rudskoi A.I., Sokolov Yu.A., Kopaev V.N. Features of modeling granules obtaining by PREP method. *Nauchno-tekhnicheskie ведомosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2015, no. 1 (214), pp. 123–129. (In Russ.). <https://doi.org/10.5862/JEST.214.14>
 27. *State Service of Standard Reference Data in the Field of Atomic Energy Use. Database on Thermophysical Properties of Gases and Their Mixtures used in Nuclear Power Plants*. Available at URL: <https://gsssd-rosatom.mephi.ru/DB-tp-02/Ar.php>. (In Russ.).
 28. Litvinenko A.I., Zhudra A.P., Belyi A.I. Analysis and kinetics of thermal centrifugal spraying of ingots from melted tungsten carbides. *Sovremennaya elektrometallurgiya*. 2013, no. 2, pp. 29–35. (In Russ.).
 29. Sentyurina Zh.A. *Production of spherical powders from nickel aluminide-based alloys NiAl for additive technologies: Cand. Tech. Sci. Diss.* Moscow: 2016, 168 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Дмитриевич Католиков, аспирант кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»; инженер-технолог, ООО «НПФ «КОМТЕРМ»
ORCID: 0000-0001-7554-1467
E-mail: vdkatolikov@yandex.ru

Александр Евгеньевич Семин, д.т.н., профессор кафедры металлургии и материаловедения, Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова, филиал НИТУ МИСиС
ORCID: 0000-0002-3287-5835
E-mail: asemin2007@yandex.ru

Ольга Александровна Комолова, к.т.н., доцент кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»; старший научный сотрудник лаборатории диагностики материалов, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН
ORCID: 0000-0001-9517-8263
E-mail: o.a.komolova@gmail.com

Иван Александрович Логачев, к.т.н., ведущий инженер лаборатории гибридных аддитивных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
ORCID: 0000-0002-8216-1451
E-mail: ivan@logachev.biz

Роман Евгеньевич Бочерилов, аспирант кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
ORCID: 0000-0002-7315-3222
E-mail: Romann961@gmail.com

Владислав Андреевич Лакиза, аспирант кафедры «Обработка металлов давлением», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
ORCID: 0000-0001-7788-1318
E-mail: lvladislavl@mail.ru

Vladimir D. Katolikov, Postgraduate of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection, National University of Science and Technology “MISIS”; Engineer-Technologist, LLC “RPC KOMTERM”
ORCID: 0000-0001-7554-1467
E-mail: vdkatolikov@yandex.ru

Aleksandr E. Semin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair “Metallurgy and Metallography”, Ugarov Sary Oskol Technological Institute of National University of Science and Technology “MISIS”
ORCID: 0000-0002-3287-5835
E-mail: asemin2007@yandex.ru

Ol’ga A. Komolova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection, National University of Science and Technology “MISIS”; Senior Researcher of the Laboratory of Materials Diagnostics, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0001-9517-8263
E-mail: o.a.komolova@gmail.com

Ivan A. Logachev, Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer of the Laboratory of Hybrid Additive Technologies, National University of Science and Technology “MISIS”
ORCID: 0000-0002-8216-1451
E-mail: ivan@logachev.biz

Roman E. Bocherikov, Postgraduate of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”
ORCID: 0000-0002-7315-3222
E-mail: Romann961@gmail.com

Vladislav A. Lakiza, Postgraduate of the Chair “Metal Forming”, National University of Science and Technology “MISIS”
ORCID: 0000-0001-7788-1318
E-mail: lvladislavl@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

V. D. Katolikov – формирование основной концепции работы, обобщение результатов исследований, построение математической модели, проведение расчетов, интерпретация результатов исследования, формирование выводов.

A. E. Semin – научное руководство, постановка цели и задачи работы, обобщение результатов исследования, корректировка выводов.

O. A. Komolova – научное руководство, доработка текста, формулировка выводов.

I. A. Logachev – проведение полупромышленных испытаний.

R. E. Bocherikov – анализ и обобщение литературных данных.

V. A. Lakiza – сбор и систематизация данных.

V. D. Katolikov – formation of the main concept of the article, generalization of the research results, construction of a mathematical model, calculations, interpretation of the research results, formation of the conclusions.

A. E. Semin – scientific guidance, setting goals and objectives of the work, summarizing the research results, correcting the conclusions.

O. A. Komolova – scientific guidance, revision of the text, formulation of the conclusions.

I. A. Logachev – semi-industrial testing.

R. E. Bocherikov – analysis and generalization of literary data.

V. A. Lakiza – collection and systematization of the data.

Поступила в редакцию 26.04.2022

После доработки 16.06.2022

Принята к публикации 20.06.2022

Received 26.04.2022

Revised 16.06.2022

Accepted 20.06.2022



Оригинальная статья

УДК 669.162.1

DOI 10.17073/0368-0797-2022-7-504-510

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2344>

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БАКАЛЬСКИХ СИДЕРИТОВ В ДОМЕННОЙ ПЛАВКЕ

А. С. Вусихис¹, Л. И. Леонтьев^{1, 2, 3}, С. Н. Агафонов¹¹ Институт металлургии УрО РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)³ Президиум РАН (Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 32а)

Аннотация. Металлургические предприятия Урала испытывают дефицит железорудного сырья, который компенсируется использованием материалов, завозимых из Центральной России, Кольского полуострова и Казахстана. Замена их на местное сырье увеличит конкурентоспособность производимого на Урале металла, поэтому вопрос оценки возможности замены привозного сырья на местное является весьма актуальным. Таким сырьем могут быть сидеритовые руды Бакальского месторождения. Они не пользуются спросом у металлургов из-за низкого содержания железа и высокого магния. Расчеты доменной плавки, произведенные с помощью балансовой логико-статистической модели, показали, что добавки обожженного и металлизированного концентратов улучшают показатели. Однако с ростом сидеритов в шихте увеличивается содержание оксида магния в шлаке, что влияет на его вязкость и делает затруднительным или невозможным плавку с использованием более 20 % сидеритов. Для разжижения шлака предложено использовать оксид бора. С помощью термодинамического моделирования проведена оценка влияния добавок в шихту 1 – 3 % B_2O_3 на химический состав шлака и распределение бора между металлической и оксидной фазой. Показано, что в процессе плавки происходит восстановление бора из шлаковой фазы и его частичный переход в металл. Это вызывает уменьшение содержания B_2O_3 в конечном шлаке. Сравнительный анализ полученных расчетных и экспериментальных данных показывает близкое содержание бора в металле, определенное теоретически и экспериментально. Это необходимо учитывать при расчете шихты. По расчетным данным основным восстановителем бора является кремний, а экспериментальные данные показывают, что им является углерод.

Ключевые слова: железорудное сырье, бакальские сидериты, обогащение руды, обжиг, металлизация, вязкость, шлак, оксид бора

Финансирование: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда по проекту № 22-29-00400.

Для цитирования: Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Агафонов С.Н. Оценка эффективности использования бакальских сидеритов в доменной плавке // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 7. С. 504–510. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-504-510>

Original article

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF USING BAKAL SIDERITES IN BLAST FURNACE SMELTING

A. S. Vusikhis¹, L. I. Leont'ev^{1, 2, 3}, S. N. Agafonov¹¹ Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)² National University of Science and Technology "MISIS" (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)³ Scientific Council on Metallurgy and Metal Science of Russian Academy of Sciences (Department of Chemistry and Material Sciences) (32a Leninskii Ave., Moscow 119991, Russian Federation)

Abstract. Metallurgical plants in the Urals are experiencing a shortage of iron ore. This has been compensated by the use of materials imported from Central Russia, the Kola Peninsula and Kazakhstan. Replacing them with local resources would increase the competitiveness of the metal produced in the Urals, which makes the question of assessing the possibility of replacing imported resources with local ones very relevant. Siderite ores from the Bakal deposit could be such resources. They are not in demand among metallurgists because of their low iron and high magnesium content. Calculations of blast furnace smelting made with the help of a balance logical-statistical model showed that additions of calcined and metallized concentrates improve performance. However, with increasing amount of siderites in the charge, the content of magnesium oxide in the slag increases. This in turn affects the viscosity and makes it difficult or impossible to smelt using more than 20 % siderites. The use of boron oxide for slag liquefaction is proposed. Thermodynamic modeling has been used to evaluate the effect of adding 1 – 3 % B_2O_3 to the charge on chemical composition of the slag and the distribution of boron between the metallic and oxide phases. It is shown that in the process of smelting, Boron is reduced from the slag phase, resulting in its partial transition into metal. This causes a decrease in the B_2O_3 content in the final slag. A comparative analysis of the calculated and experimental data shows a similar content of boron in metal, which has been determined both theoretically and experimentally. This should be taken into account when calculating the charge. According to the data obtained, the main reducing agent of boron is silicon, while experimental data show that it is carbon.

Keywords: iron ore, Bakal siderites, ore processing, roasting, metallization, viscosity, slag, boron oxide

Funding: The work was supported by the Russian Science Foundation under project No. 22-29-00400.

For citation: Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Agafonov S.N. Assessment of the efficiency of using Bakal siderites in blast furnace smelting. *Izvestiya Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 7, pp. 504–510. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-504-510>

На Урале сосредоточено 14 % общих запасов железных руд России, что составляет 13,87 млрд т (из них категории $A + B + C_1 - 8,51$ млрд т), а их ежегодная добыча – 22 % от всероссийской [1]. В то же время, металлургические предприятия Урала испытывают дефицит железорудного сырья [2 – 6]. Руда собственной добычи составляет 50 – 60 %. Остальное количество материалов завозится из Центральной России (Михайловский, Лебединский горно-обогатительные комбинаты), Кольского полуострова (Костомукшский ГОК) и Казахстана (Соколовско-Сарбайский ГОК). Это связано с тем, что из 50 месторождений Урала, учтенных государственным балансом, эксплуатируется всего 23. В силу различных причин на многих месторождениях Урала разработка не производится совсем или осуществляется недостаточно интенсивно. В частности, в Челябинской области расположено Бакальское месторождение карбонатных (сидеритовых) железных руд. Его запасы по категориям $A + B + C_1 + C_2$ составляют около 1 млрд т [7 – 9]. Горно-геологические условия позволяют добывать ежегодно до 20 – 25 млн т руды. Реальная добыча во много раз меньше. Это связано со слабым интересом металлургов к этому сырью из-за его низкого качества. Содержание железа в сырой руде не превышает 36 % [10]. Обжиг-магнитное обогащение позволяет увеличить его до 50 % [11], а металлизация до 70 % [12, 13]. Однако везде сохраняется большое количество пустой породы из-за отсутствия эффективной технологии его удаления [14].

Поскольку постоянное повышение железнодорожных тарифов приводит к увеличению стоимости производимого на Урале металла, что снижает его конкурентоспособность, вопрос оценки возможности замены привозного сырья на местное является весьма актуальным.

С этой целью был проведен анализ эффективности использования сидеритовых руд Бакальского месторождения в доменной плавке путем сравнения показателей работы доменной печи № 9 Магнитогорского металлургического комбината (ММК) (табл. 1) с результатами аналитических расчетов. В расчетах прогнозировалось изменение параметров плавки при частичной замене в рудной составляющей шихты, состоящей из смеси агломерата ММК и окатышей Соколовско-Сарбайского ГОКа (ССГОК), взятых в соотношении 2/1, на материалы, изготовленные из сидеритов по различным технологиям подготовки их к доменной плавке (табл. 2). Были использованы сырая сидеритовая руда (СС), концентрат, полученный в результате обжиг-магнитного обогащения (ОК) и концентраты, восстановленные до различной степени металлизации (МК).

Для проведения расчетов применялась математическая балансовая логико-статистическая модель [15], основанная на использовании тепловых и материальных балансов доменной плавки, закономерностей тепло- и массообмена, учитывающих кинетические факторы восстановления оксидов железа, температуры чугуна и шлака, а также статистических данных о влиянии различных факторов на показатели работы печи.

Результаты расчетов приведены на рис. 1. Из них следует, что показатели доменной плавки при увеличении количества сидеритов в шихте изменяются линейно.

Добавки сырого сидерита снижают производительность печи и увеличивают расход кокса. Это связано с тем, что из-за уменьшения среднего содержания железа в шихте для получения 1 т чугуна расходуется большее количество руды. Кроме того, процессу восстановления сырых сидеритов предшествует их декарбонизация [16], что сдвигает процесс в зону прямого восстановления и требует увеличения общего расхода теплоты.

Использование сырых сидеритов для замены привозного сырья малоэффективно. При использовании обожженного сидерита показатели плавки ухудшаются незначительно. Изменение не превышает 5,5 %. Замена на металлизированный концентрат приводит к улучшению показателей плавки, и чем выше металлизация, тем показатели выше. Это говорит о возможной эффективности замены при меньшей стоимости сидеритовых концентратов по сравнению с привозными материалами.

Однако при этом следует учитывать то, что одним из основных условий высокой эффективности доменной плавки является выбор оптимального шлакового режима. В связи с этим, к доменным шлакам предъявляются определенные требования. При температуре горна (1500 °С) они должны обладать:

- вязкостью $<0,3 - 0,35$ Па·с и <5 Па·с на выпусках;
- легкоплавкостью;
- низкой температурой начала кристаллизации [17].

Пустая порода сидеритов, независимо от методов их подготовки, более чем на половину состоит из оксида магния, который в процессе плавки полностью переходит в шлак. По расчетам, при добавках 45 % сидеритов в шихту его содержание в шлаке составляет около 30 %.

Исследования свойств высокомагнезиальных доменных шлаков показали, что для ведения доменной плавки на бакальских сидеритах оптимальными являются шлаки с содержанием $MgO \sim 10 - 15$ % при основности $(CaO/SiO_2) = 0,8 - 1,0$, а по обессерива-

Базовые показатели доменной плавки (A_0)

Table 1. Basic indicators of blast-furnace smelting (A_0)

Полезный объем печи, м ³	2014	Чугун	
Производительность, т/сут	4390	состав, %	
Общий расход руды, кг/т чугуна	1660	Si	0,70
Агломерат ММК, кг/т чугуна	1110	Ti	0
Окатыши ССГОК, кг/т чугуна	550	S	0,02
Среднее содержание Fe, %	58,80	Mn	0,60
Общий расход флюса, кг/т чугуна	8	Ni	0
Общий расход кокса, кг/т чугуна	450	P	0,05
Выход пыли, кг/т чугуна	32	Fe	94,00
Потери металла, кг/т чугуна	20	C	4,50
Расход газообразного топлива, м ³ /т чугуна	97	температура, °C	1470
Дутье		Шлак	
количество	м ³ /т чугуна	1070	выход, кг/т чугуна
	м ³ /мин	3262	состав, %
температура, °C	1064	SiO ₂	35,10
влажность, г/м ³	8	CaO	40,20
кислород	м ³ /т чугуна	26,4	MgO
	м ³ /мин	13 830	Al ₂ O ₃
Колошниковый газ		TiO ₂	0,30
выход, м ³ /т чугуна	1650	FeO	0,60
давление, атм	1,44	MnO	0,10
содержание в колошниковом газе, %	CO	24,2	R ₂ O
	CO ₂	20,1	S
	H ₂	7,8	CaO/SiO ₂
температура, °C	187	Тепловой баланс, мДж/т чугуна	
теплотворная способность, кДж	3903	приход	10 250
степень использования	CO	0,45	расход
	H ₂	0,43	Материальный баланс, кг/т чугуна
Теоретическая температура горения, °C	2018	приход	3585
		расход	3585

ющей способности высокомагнезиальные шлаки не уступают обычным маломагнезиальным. При этом увеличение концентрации MgO до 15 – 20 % при той же основности не вызывает больших затруднений в ходе плавки. Такие шлаки кристаллизуются при температурах ниже 1350 °C и жидкоподвижны [18, 19]. Дальнейшее увеличение содержания оксида магния в шлаках делает их короткими и тугоплавкими. Шлак, содержащий 30 % MgO, при температуре 1400 °C будет находиться в твердом состоянии [13]. Это позволяет сделать вывод о том, что плавка на шихте, содержащей более 20 % MgO, затруднительна или невозможна. Однако известно [20, 21], что добавка в доменные шлаки оксида бора снижает их вязкость во всем диапазоне температур и делает их более длинными. Поскольку изучались

шлаки, содержащие менее 20 % MgO, можно только предположить, что и для шлаков с более высоким содержанием оксида магния эта тенденция сохранится. Для подтверждения данного предположения необходимо проведение соответствующих экспериментальных исследований.

Допуская возможность проведения доменной плавки при увеличении содержания оксида магния в шлаке до 30 % за счет добавок 20 – 45 % концентрата обжиг-магнитного обогащения, с помощью балансовой логико-статистической модели оценили влияние добавок 1 – 3 % B₂O₃ на ее ход.

Расчеты показывают, что показатели плавки меняются незначительно, в пределах 3 %. Производительность и среднее содержание железа уменьшаются, а расход

Химический состав рудных компонентов

Table 2. Chemical composition of ore components

Компонент	Агломерат ММК	Окатыши ССГОК	СС	ОК	МК 20 %	МК 40 %	МК 60 %	МК 80 %
			Обозначения на графиках					
			1	2	3	4	5	6
Fe _{общ.}	56,64	63,10	34,54	49,75	55,15	56,94	58,86	60,91
Fe _{мет.}	0	0	0	0	11,03	22,78	35,32	48,73
FeO	10,91	3,75	40,47	1,54	56,72	43,93	30,27	15,66
CaO	9,53	1,24	1,95	2,81	3,11	3,20	3,32	3,44
MgO	2,00	0,40	8,01	11,54	12,79	13,21	13,65	14,12
SiO ₂	5,72	5,31	7,20	10,37	11,50	11,87	12,27	12,70
Al ₂ O ₃	1,60	2,10	0,99	1,43	1,58	1,63	1,69	1,75
MnO	0,70	0,10	1,83	2,64	2,92	3,02	3,12	3,23
P ₂ O ₅	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04
SO ₃	0,08	0,12	0	0,30	0,31	0,32	0,33	0,35
CaCO ₃	0	0	1,53	0	0	0	0	0
MgCO ₃	0	0	32,18	0	0	0	0	0
MnCO ₃	0	0	0,89	0	0	0	0	0
FeS ₂	0	0	0,60	0	0	0	0	0

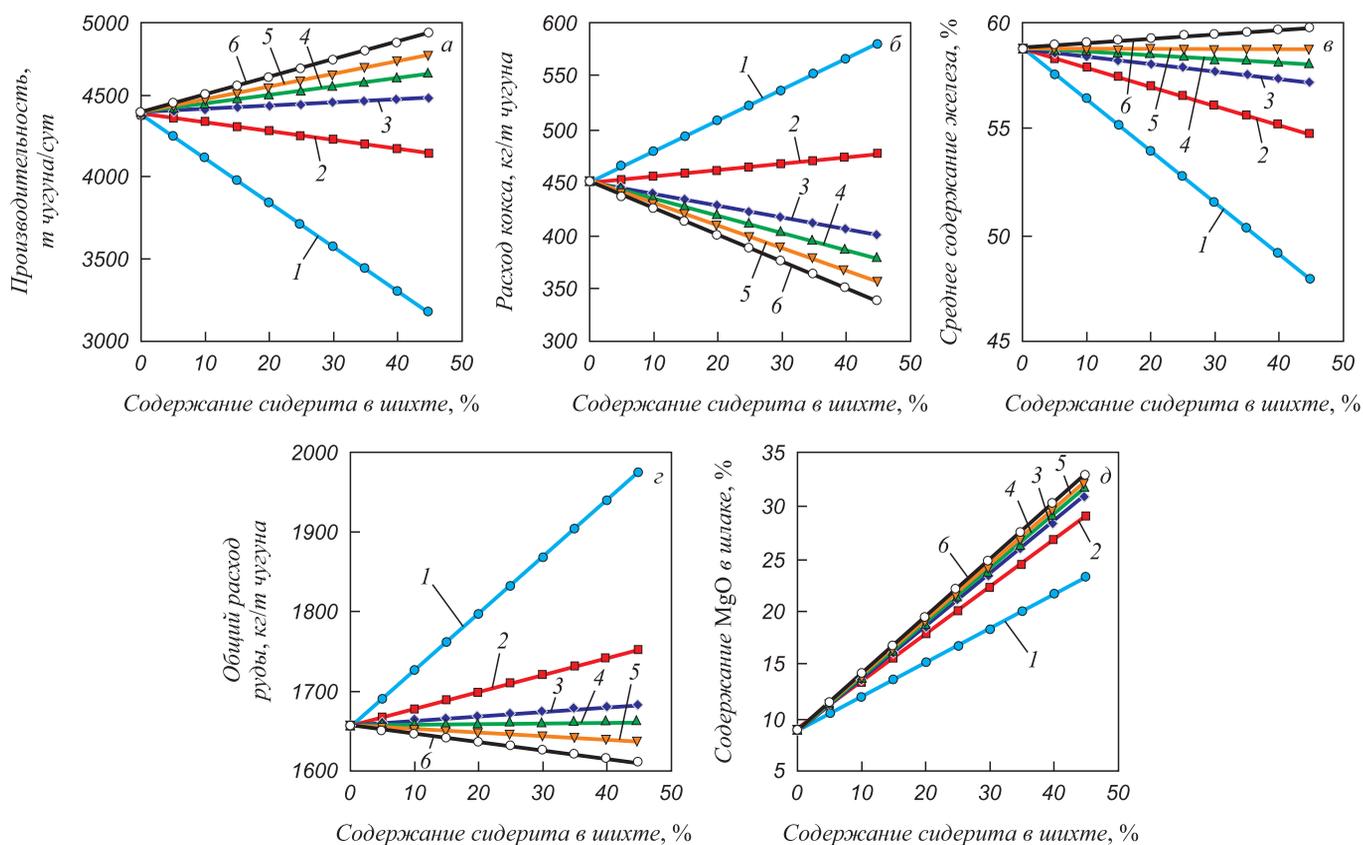


Рис. 1. Зависимость показателей доменной плавки от доли сидерита в шихте, % (используемый материал: 1 (■), 2 (●), 3 (◆), 4 (▲), 5 (▼), 6 (○) – см. табл. 2)

Fig. 1. Dependence of indicators of blastfurnace smelting on the proportion of siderite in the charge, % (material used: 1 (■), 2 (●), 3 (◆), 4 (▲), 5 (▼), 6 (○) – see Table 2)

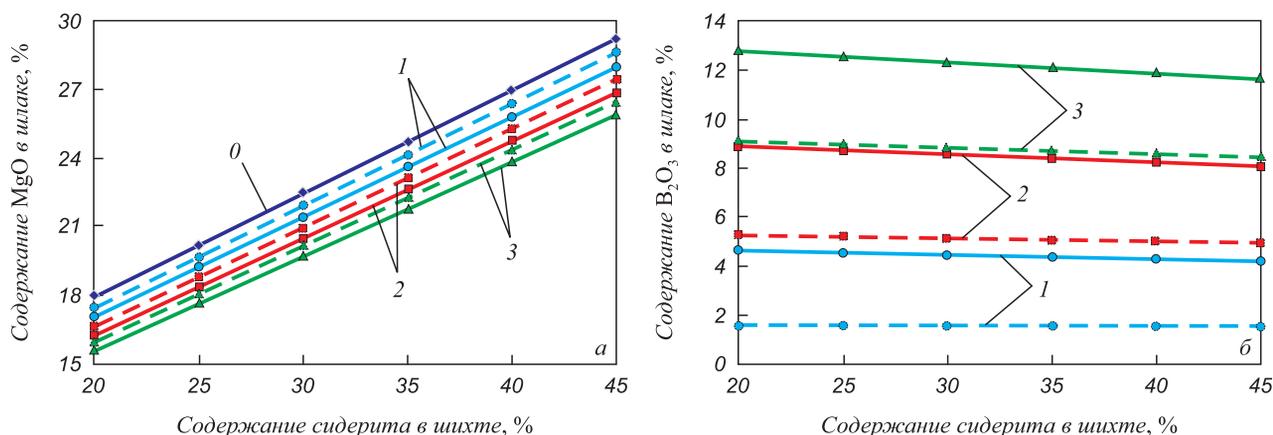


Рис. 2. Изменение содержания оксида магния и оксида бора в шлаке в зависимости от доли сидерита в шихте, % (цифры – содержание B_2O_3 в исходной шихте)

Fig. 2. Change in the content of magnesium oxide and boron oxide in the slag depending on the proportion of siderite in the charge, % (numbers – the content of B_2O_3 in the initial charge)

кокса и общий расход руды увеличиваются. Добавление B_2O_3 приводит к уменьшению содержания в шлаке всех оксидных составляющих, в том числе MgO , и появлению B_2O_3 (сплошные линии рис. 2).

Логико-статистическая модель не позволяет оценить распределение бора между металлом и шлаком. Для этого использовано термодинамическое моделирование с помощью программы ИВТАНТЕРМО [22].

В качестве рабочего тела выбрана система:

- 1 кг металла, содержащего 94,75 % Fe, 0,75 % Si, 4,5 % C;

- шлак, масса которого менялась в зависимости от доли в исходной рудной части сидерита и оксида бора от 360 до 450 г, содержащий от 31 – 36 % SiO_2 , 19 – 27 % CaO, 8,5 – 11,5 % Al_2O_3 , 4,4 – 12,8 % B_2O_3 (согласно данным расчетов по логико-статистической модели);

- среда – аргон, давление – 10^5 Па, температура – 1470 °С.

Для упрощения принято, что металлический и оксидный расплавы являются идеальными растворами. Расчеты показали, что независимо от доли сидеритов в шихте, при добавке к ней 1, 2, 3 % B_2O_3 , в металл переходит 0,36, 0,45, 0,49 % бора соответственно. Содержание B_2O_3 в шлаке уменьшается, а остальных компонентов, в том числе MgO , увеличивается (пунктирные линии рис. 2).

В работе [23] показано, что при добавке к рудной части шихты доменных печей ММК 20 % окатышей ССГОКа, содержащих 0,26 % B_2O_3 , количество бора в полученном чугуна составило 0,007 %, а B_2O_3 в шлаке – 0,12 %.

В связи с тем, что эти данные значительно отличаются от полученных расчетным путем в результате термодинамического моделирования, экспериментально оценено распределение бора между металлом и шлаком. Для этого путем переплава смеси оксидов в печи сопротивления с графитовым нагревателем (печь

Таммана) при температуре 1500 – 1550 °С получен синтетический шлак состава, %: 35,6 SiO_2 ; 21,1 CaO; 25,2 MgO; 9,1 Al_2O_3 ; 8,3 B_2O_3 . Металлический сплав, содержащий 4,2 % C и 1,4 % Si, получен путем переплава железа с кремнием и углеродом в печи сопротивления с графитовым нагревателем в контролируемой атмосфере (Ar) при температуре 1550 °С (печь ТВВ). На следующем этапе проведен переплав полученного металлического продукта (чугун) с оксидным (шлак) из расчета 40 г шлака на 100 г чугуна. Состав шихты: чугун – 167,2 г; шлак – 66,8 г. Переплав чугуна и шлака проводили в печи сопротивления с графитовым нагревателем в контролируемой атмосфере (Ar) при температуре 1550 °С (печь ТВВ). В результате получен сплав на основе железа, содержащий, %: 2,8 C; 2,2 Si; 0,84 В и шлак состава, %: 40,2 SiO_2 ; 21,2 CaO; 25,3 MgO; 9,1 Al_2O_3 ; 4,1 B_2O_3 . Для сравнения проведен термодинамический расчет равновесия рабочего тела того же состава и в тех же условиях. В результате получен металл, содержащий, %: 4,2 C; 0,2 Si; 0,6 В и шлак состава, %: 41,9 SiO_2 ; 21,0 CaO; 25,1 MgO; 9,1 Al_2O_3 ; 3,0 B_2O_3 .

Сравнительный анализ полученных расчетных и экспериментальных данных показывает близкое содержание бора в металле, определенное теоретически и экспериментально, а также, что восстановление бора вызывает уменьшение его содержания в конечном шлаке и это необходимо учитывать при расчете шихты. По расчетам основным восстановителем бора является кремний, а экспериментальные данные показывают, что им является углерод.

Выводы

Результаты аналитических расчетов, прогнозирующих параметры доменной плавки с помощью математической балансовой логико-статистической модели, по-

казали, что в результате использования сидеритов для замена части доменного привозного сырья образуется шлак с большим содержанием оксида магния. Это отрицательно скажется на его физико-химических свойствах, а именно: вязкости и температуре кристаллизации. В случае использования разжижающих флюсов и получения жидкоподвижного шлака, замена в шихте части привозного сырья на обжиг-магнитный или металли-

зованный концентрат, изготовленный из сидеритовой руды Бакальского месторождения, позволит снизить себестоимость получаемой продукции. Предполагается, что использование в качестве флюса материалов, содержащие оксид бора, позволит получить шлак с необходимыми свойствами. Показано теоретически и экспериментально, что в результате будет получен чугун с содержанием бора около 1 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Чернобровин В.П. Сырьевая безопасность черной металлургии России // *Пространство и Время*. 2011. № 3(5). С. 111–118.
2. Волков Ю.В., Соколов И.В., Смирнов А.А. Стратегия освоения сырьевых ресурсов Урала // *Горная Промышленность*. 2006. № 4. С. 57–62.
3. Волков Ю.В., Славиковский О.В., Соколов И.В., Смирнов А.А. Перспективы развития сырьевой базы горно-металлургических предприятий Урала // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2007. № 5. С. 286–290.
4. Пахомов В.П., Душин А.В. Оценка минерально-сырьевой безопасности УрФО // *Экономика региона*. 2008. № 3. С. 129–143.
5. Валиев Н.Г., Славиковский О.В., Славиковская Ю.О. Особенности освоения минерально-сырьевой базы на урбанизированных территориях Урала // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012. № 6. С. 344–347.
6. Корнилов С.В., Кантемиров В.Д. Железорудные месторождения Приполярного Урала как перспективная сырьевая база уральской металлургии // *Известия вузов. Горный журнал*. 2015. № 8. С. 22–28.
7. Эффективность и перспективы применения сидеритовых руд в доменной плавке / В.А. Красноборов, С.Л. Ярошевский, А.А. Денисов, В.С. Рудин, В.И. Бирючев, М.Ф. Полушкин. Донецк, 1996. 88 с.
8. Юрьев Б.П., Меламуд С.Г., Спиринов Н.А., Шацилло В.В. Технологические и теплотехнические основы подготовки сидеритовых руд к металлургическим переделам. Екатеринбург: ООО АМК «День РА», 2016. 428 с.
9. Вусихис А.С., Леонтьев Л.И. Применение сидеритовых руд при производстве чугуна и стали. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 116 с.
10. Ахлюстина А.И., Жуковский Г.В., Квасков А.П. Технологическая классификация железных руд Бакальского месторождения // *Труды института «Уралмеханобр»*. 1972. № 18. С. 37–43.
11. Жунев А.Г., Федоренко Н.В., Червоткин В.В. и др. Окислительный обжиг сидеритовых руд в шахтных печах // *Окислование железных руд и концентратов*. Труды института «Уралмеханобр». 1976. № 3. С. 28–38.
12. Бланк М.Э., Червоткин В.В., Кончаковский В.Р. Разработка и исследование двухстадийного способа металлизации железорудного сырья в трехзонной шахтной печи // *Теория и практика прямого получения железа*. Москва: Наука, 1986. С. 207–211.
13. Юрьев Б.П., Дудко В.А. Обоснование необходимости восстановления сидеритовой руды и разработка газовой схемы для получения восстановительного газа // *Сталь*. 2022. № 1. С. 2–6.
14. Пирометаллургическая переработка комплексных руд / Л.И. Леонтьев, Н.А. Ватолин, С.В. Шаврин, Н.С. Шумаков. Москва: Металлургия, 1997. 432 с.
15. Ченцов А.В., Чесноков Ю.А., Шаврин С.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса. Москва: Наука, 1991. 92 с.
16. Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Кудинов Д.З., Гуляков В.С. Металлизация сидеритовой руды при восстановительном обжиге // *Металлы*. 2016. № 3. С. 8–13.
1. Chernobrovin V.P. Raw material security of ferrous metallurgy in Russia. *Prostranstvo i vremya*. 2011, no. 3(5), pp. 111–118. (In Russ.).
2. Volkov Yu.V., Sokolov I.V., Smirnov A.A. Strategy for development of the Urals raw material resources. *Gornaya promyshlennost'*. 2006, no. 4, pp. 57–62. (In Russ.).
3. Volkov Yu.V., Slavikovskii O.V., Sokolov I.V., Smirnov A.A. Prospects for development of the raw material base of mining and metallurgical enterprises in the Urals. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2007, no. 5, pp. 286–290. (In Russ.).
4. Pakhomov V.P., Dushin A.V. Assessment of mineral and raw material security of the UFD. *Ekonomika regiona*. 2008, no. 3, pp. 129–143. (In Russ.).
5. Valiev N.G., Slavikovskii O.V., Slavikovskaya Yu.O. Peculiarities of mineral resource base development in urbanized territories of the Urals. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2012, no. 6, pp. 344–347. (In Russ.).
6. Kornilkov S.V., Kantemirov V.D. Iron ore deposits of the Subpolar Urals as a promising raw material base for the Urals metallurgy. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 2015, no. 8, pp. 22–28. (In Russ.).
7. Krasnoborov V.A., Yaroshevskii S.L., Denisov A.A., Rudin V.S., Biryuchev V.I., Polushkin M.F. *Efficiency and Prospects of Using Siderite Ores in Blast Furnace Smelting*. Donetsk, 1996, 88 p. (In Russ.).
8. Yur'ev B.P., Melamud S.G., Spirin N.A., Shatsillo V.V. *Technological and Thermal Engineering Bases of Siderite Ore Preparation for Metallurgical Processing: Monograph*. Yekaterinburg: ООО АМК «Den' RA», 2016, 428 p. (In Russ.).
9. Vusikhis A.S., Leont'ev L.I. *Application of Siderite Ores in Iron and Steel Production: Monograph*. Moscow; Vologda: Infra-Inzheneriya, 2022, 116 p. (In Russ.).
10. Akhlyustina A.I., Zhukovskii G.V., Kvaskov A.P. Technological classification of iron ores of the Bakal deposit. In: *Proceedings of the Institute "Uralmexanobr"*. Sverdlovsk, 1972, no. 18, pp. 37–43. (In Russ.).
11. Zhunev A.G., Fedorenko N.V., Chervotkin V.V., etc. Oxidative roasting of siderite ores in shaft furnaces. In: *Pelletizing of Iron Ores and Concentrates: Proceedings of the Institute "Uralmexanobr"*. Sverdlovsk, 1976, no. 3, pp. 28–38. (In Russ.).
12. Blank M.E., Chervotkin V.V., Konchakovskii V.R. Development and study of two-stage method of iron ore raw materials metallization in a three-zone shaft furnace. In: *Theory and Practice of Direct Production of Iron*. Moscow: Nauka, 1986, pp. 207–211. (In Russ.).
13. Yur'ev B.P., Dudko V.A. Rationale for reduction of siderite ore and development of gas scheme to produce reducing gas. *Stal'*. 2022, no. 1, pp. 2–6. (In Russ.).
14. Leont'ev L.I., Vatolin N.A., Shavrin S.V., Shumakov N.S. *Pyrometallurgical Processing of Complex Ores*. Moscow: Metallurgiya, 1997, 432 p. (In Russ.).
15. Chentsov A.V., Chesnokov Yu.A., Shavrin S.V. *Balance Logical-Statistical Model of Blast Furnace Process*. Moscow: Nauka, 1991, 92 p. (In Russ.).
16. Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Kudinov D.Z., Gulyakov V.S. Metallization of siderite ore in reducing roasting. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2016, vol. 2016, no. 5, pp. 404–408. <https://doi.org/10.1134/S0036029516050153>

17. Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Кудинов Д.З., Шешуков О.Ю. Анализ современных методов переработки сидеритовых руд // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2011. № 3. С. 49–52.
18. Вяткин В.П., Гаврилюк Л.Я., Остроухов М.Я. и др. Опытные плавки с участием в шихте Бакальских сидеритов // Шлаковый режим доменных печей. Москва: Metallurgiya, 1961. 350 с.
19. Жило Н.Л. Формирование и свойства доменных шлаков. Москва: Metallurgiya, 1974. 120 с.
20. Акбердин А.А., Киреева Г.М., Ким А.С. Физические свойства борсодержащих доменных шлаков // Комплексное использование минерального сырья. 1996. № 3. С. 27–31.
21. Liu W., Pang Z., Wang J., Zuo H., Xue Q. Investigation of viscosity and structure of CaO–SiO₂–MgO–Al₂O₃–BaO–B₂O₃ slag melt // *Ceramics International*. 2022. Vol. 48. No. 12. P. 17123–17130. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.02.268>
22. Belov G.V., Iorish V.S., Yungman V.S. IVTANTHERMO for Windows – database on thermodynamic properties and related software // *Calphad*. 1999. Vol. 23. No. 2. P. 173–180. [https://doi.org/10.1016/S0364-5916\(99\)00023-1](https://doi.org/10.1016/S0364-5916(99)00023-1)
23. Акбердин А.А., Ким А.С. Доменная плавка на борсодержащих шлаках // Теория и практика производства чугуна: Труды Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию КГМК «Криворожсталь». Кривой Рог, 2004. С. 146–149.
17. Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Kudinov D.Z., Sheshukov O.Yu. Analysis of modern methods of siderite ore processing. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2011, no. 3, pp. 49–52. (In Russ.).
18. Vyatkin V.P., Gavriilyuk L.Ya., Ostroukhov M.Ya., etc. Experimental smelts with Bakal siderites in charge. In: *Slag Mode of Blast Furnaces*. Moscow: Metallurgiya, 1961, 350 p. (In Russ.).
19. Zhilo N.L. *Formation and Properties of Blast Furnace Slag*. Moscow: Metallurgiya, 1974, 120 p. (In Russ.).
20. Akberdin A.A., Kireeva G.M., Kim A.S. Physical properties of boron-containing blast furnace slag. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya*. 1996, no. 3, pp. 27–31. (In Russ.).
21. Liu W., Pang Z., Wang J., Zuo H., Xue Q. Investigation of viscosity and structure of CaO–SiO₂–MgO–Al₂O₃–BaO–B₂O₃ slag melt. *Ceramics International*. 2022, vol. 48, no. 12, pp. 17123–17130. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.02.268>
22. Belov G.V., Iorish V.S., Yungman V.S. IVTANTHERMO for Windows – database on thermodynamic properties and related software. *Calphad*. 1999, vol. 23, no. 2, pp. 173–180. [https://doi.org/10.1016/S0364-5916\(99\)00023-1](https://doi.org/10.1016/S0364-5916(99)00023-1)
23. Akberdin A.A., Kim A.S. Blast furnace smelting with boron-containing slags. In: *Theory and Practice of Cast Iron Production: Proceedings of the Int. Sci. and Pract. Conf. dedicated to the 70th Anniversary of KGMK Krivorozhstal*. Krivoi Rog, 2004, pp. 146–149. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Семенович Вусихис, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии цветных металлов, Институт металлургии УрО РАН
ORCID: 0000-0002-6395-0834
E-mail: vas58@mail.ru

Aleksandr S. Vusikhis, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Non-Ferrous Metals, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science
ORCID: 0000-0002-6395-0834
E-mail: vas58@mail.ru

Леопольд Игоревич Леонтьев, академик, советник, Президиум РАН, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», главный научный сотрудник, Институт металлургии УрО РАН
ORCID: 0000-0002-4343-914X
E-mail: leo@presidium.ras.ru

Leopold I. Leont'ev, Academician, Adviser, Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Prof., National University of Science and Technology "MISIS", Chief Researcher, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science
ORCID: 0000-0002-4343-914X
E-mail: leo@presidium.ras.ru

Сергей Николаевич Агафонов, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории пирометаллургии цветных металлов, Институт металлургии УрО РАН
E-mail: agafonovs@ya.ru

Sergei N. Agafonov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Laboratory of Pyrometallurgy of Non-Ferrous Metals, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science
E-mail: agafonovs@ya.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

А. С. Вусихис – постановка задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.
Л. И. Леонтьев – научное руководство, анализ результатов исследований, редактирование статьи.
С. Н. Агафонов – проведение расчетов, проведение экспериментов.

A. S. Vusikhis – setting the research problem, performing the calculations, preparing the text, formation of the conclusions.
L. I. Leont'ev – scientific guidance, analysis of the research results, editing the article.
S. N. Agafonov – performing the calculations, conducting the experiments.

Поступила в редакцию 13.07.2022
 После доработки 15.07.2022
 Принята к публикации 16.07.2022

Received 13.07.2022
 Revised 15.07.2022
 Accepted 16.07.2022



Оригинальная статья

УДК 622.272/275.34; 504.05/06:622.34

DOI 10.17073/0368-0797-2022-7-511-518

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2345>



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ИЗ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ РУД

В. И. Голик^{1,2}, О. З. Габараев¹, Ю. И. Разоренов³, С. А. Масленников⁴

¹Северо-Кавказский государственный технологический университет (Россия, 363021, Республика Северная Осетия – Алания, Владикавказ, ул. Николаева, 44)

²Московский политехнический университет (Россия, 107023, Москва, ул. Большая Семеновская, 38)

³Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова (Россия, 346428, Ростовская обл., Новочеркасск, ул. Просвещения, 132)

⁴Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) Донского государственного технического университета (Россия, 346500, Ростовская обл., Шахты, ул. Шевченко, 147)

Аннотация. Обозначена проблема истощения доступных минерально-сырьевых ресурсов и охарактеризованы причины ее актуализации из-за неполного извлечения металлов из добытых руд. Авторы отмечают, что стратегией горной отрасли может быть использование нетрадиционных технологий добычи металлов в рамках комбинирования традиционных и инновационных технологий выщелачивания. Обосновано, что утилизация хвостов обогащения, формирование алгоритма процессов и инженерный прогноз перспективной технологии являются реальным направлением развития горного производства. Статья описывает методику экспериментального обоснования возможности безотходной утилизации хвостов обогащения железистых кварцитов Курской магнитной аномалии. Приведены матрицы планирования и результаты сравнения технологий традиционного выщелачивания хвостов обогащения в агитаторах и выщелачивания в скоростной мельнице-дезинтеграторе с регрессионным анализом экспериментальных данных и графической интерпретацией. Дана справка о процессах механоактивации, как реальной возможности улучшения показателей процессов переработки металлосодержащего сырья, в том числе при вовлечении в производство хвостов обогащения. Полученные результаты экспериментов могут быть востребованы в гидрометаллургических процессах, включая выщелачивание металлов из хвостов обогащения, повышая их извлечение. Приведены сведения о содержании металлов во вторичных хвостах после выщелачивания в дезинтеграторе с механохимической активацией процессов. Авторы обозначили направления совершенствования процессов подготовки металлосодержащего сырья к выщелачиванию в дезинтеграторах-активаторах. Показано, что экономическая эффективность безотходной утилизации хвостов обогащения складывается стоимостью извлеченных металлов, сырья для смежных отраслей и снижения ущерба окружающей среде от хранения токсичных хвостов первичной переработки.

Ключевые слова: горное производство, хвосты обогащения, методика, эксперимент, железистые кварциты

Для цитирования: Голик В.И., Габараев О.З., Разоренов Ю.И., Масленников С.А. Исследование процессов выщелачивания металлов из хвостов обогащения руд // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 7. С. 511–518. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-511-518>

Original article

METAL LEACHING FROM ORE DRESSING TAILINGS

V. I. Golik^{1,2}, O. Z. Gabaraev¹, Yu. I. Razorenov³, S. A. Maslennikov⁴

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

²Moscow Polytechnic University (38 Bol'shaya Semenovskaya Str., Moscow 107023, Russian Federation)

³Platov South-Russian State Polytechnic University (132 Prosveshcheniya Str., Novocherkassk, Rostov Region 346428, Russian Federation)

⁴Institute of Service and Entrepreneurship (Branch) of the Don State Technical University (147 Shevchenko Str., Shakhty, Rostov Region 346500, Russian Federation)

Abstract. The problem of depletion of available mineral resources is identified and the reasons for its actualization are characterized due to incomplete extraction of metals from mined ores. It is noted that the strategy of the mining industry may be the use of unconventional technologies of metal extraction within the framework of combining traditional technologies with innovative leaching ones. It is proved that utilization of enrichment tailings, formation of the processes algorithm and engineering forecast of the prospects of the new technology are the real directions of mining production development. The paper considers a method of experimental substantiation of the possibility of waste-free utilization of ferruginous quartzite dressing

tailings from the Kursk Magnetic Anomaly. The planning matrices and the results of comparing the technologies of traditional leaching of dressing tailings in conditioners and leaching in a high-speed disintegrator mill are presented with regression analysis of experimental data and graphical interpretation. A reference is given on the processes of mechanical activation, as a real opportunity to improve the indicators of the processing metal-containing raw materials, including involving dressing tailings in production. The experimental results obtained can be used in hydrometallurgical processes, including leaching of metals from dressing tailings, increasing the extraction of metals with a higher content. The paper considers the data on the metals content in secondary tailings after leaching in a disintegrator with mechanochemical processes activation. The directions of improvement of preparation of metal-containing raw materials for leaching in conditioners – disintegrators are indicated. The economic efficiency of waste-free disposal of dressing tailings is composed of the cost of extracted metals, raw materials for related industries and reducing environmental damage from the storage of toxic tailings of primary processing.

Keywords: mining, dressing tailings, methodology, experiment, ferruginous quartzites

For citation: Golik V.I., Gabaraev O.Z., Razorenov Yu.I., Maslennikov S.A. Metal leaching from ore dressing tailings. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 7, pp. 511–518. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-511-518>

ВВЕДЕНИЕ

В середине XX столетия перед горными отраслями России встала проблема истощения доступных для добычи минерально-сырьевых ресурсов.

Проблема использования минерально-сырьевых ресурсов заключается в недостаточно полном использовании запасов, в первую очередь неполным извлечением компонентов из добытого сырья. В связи с этим в хвостах переработки большинства руд стоимость не извлеченных компонентов нередко сравнима со стоимостью извлеченных [1 – 3].

Причиной кризиса горного производства является применение устаревших технологий добычи, обогащения и металлургического передела руд. Стратегией выживания горных отраслей может стать использование нетрадиционных технологий добычи металлов в рамках комбинирования традиционных и инновационных технологий выщелачивания, которые являются основными на 12 предприятиях России [4 – 7].

Вопросы выщелачивания металлов формируют актуальную научную и практическую проблему, включающую в себя анализ теории и практики, вопросы подготовки металлосодержащих ресурсов и выбора рациональных схем комбинирования технологий добычи металлов традиционным способом и выщелачиванием.

Традиционные технологии обогащения не обеспечивают полного раскрытия минералов, поэтому обогатительные процессы совершенствуются путем привлечения операций гидрометаллургической переработки.

Реализация стратегии ресурсосбережения нуждается в разработке научных основ, регламентирующих решение вопросов перевода металлов в мобильное состояние, извлечения металлов из раствора, утилизации продуктов технологии со снижением техногенной нагрузки на окружающую среду [8 – 11].

Целью настоящего исследования является утилизация хвостов обогащения железистых кварцитов, формирование алгоритма процессов и инженерный прогноз перспектив новой технологии.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются хвосты мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов обогатительной фабрики Лебединского ГОКа, содержащие до 80 % фракции менее 0,076 мм, представленные кварцем, магнетитом, гематитом, карбонатами и другими минералами, в составе которых 8 % Fe, 5 % Al, 3 % Mn и др.

Химический состав отобранной для исследования пробы хвостов, % (по массе): 64,0 SiO₂; 8,0 Fe; 5,2 Al₂O₃; 3,2 Mn; 0,7 K₂O; 0,1 P; 0,8 Ca; 0,2 MgO; 5·10⁻³ Cu; 4·10⁻³ Ni; 5·10⁻⁴ Zn; As, Ba, Be, Bi, Co, Cr, Li, Mo, Nb, Pb, Sb, Sn, Sr, Ti, V, Y – на уровне (30 – 50)·10⁻⁵.

При ранжировании технологий переработки хвостов обогащения в качестве базы для сравнения используются результаты выщелачивания доступными альтернативными методами.

Для проведения экспериментов использованы лабораторный дезинтегратор ДЕЗ-11 и электромеханическая мешалка с реакционным сосудом. Комплекс исследования процесса выщелачивания металлов включает в себя операции, показанные на рис. 1.

Хвосты обогащения перерабатываются альтернативными методами выщелачивания с получением количественных характеристик процессов, которые становятся критерием оценки технологий.

Содержание реагентов в зависимости от решаемой задачи изменяется, г/л: серной кислоты – 2 – 10; хлорида натрия – 20 – 160.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки эффективности извлечения металлов из хвостов обогащения в качестве базы использовали результаты агитационного выщелачивания (рис. 2).

Для извлечения металлов в раствор использованы лабораторный дезинтегратор ДЕЗ-11 и электромеханическая мешалка. Комплекс исследования процесса извлечения металлов включал в себя операции:

- измельчение до крупности – 2 мм;
- сушка при температуре 60 °С до влажности 2 %;
- отбор и подготовка пробы;

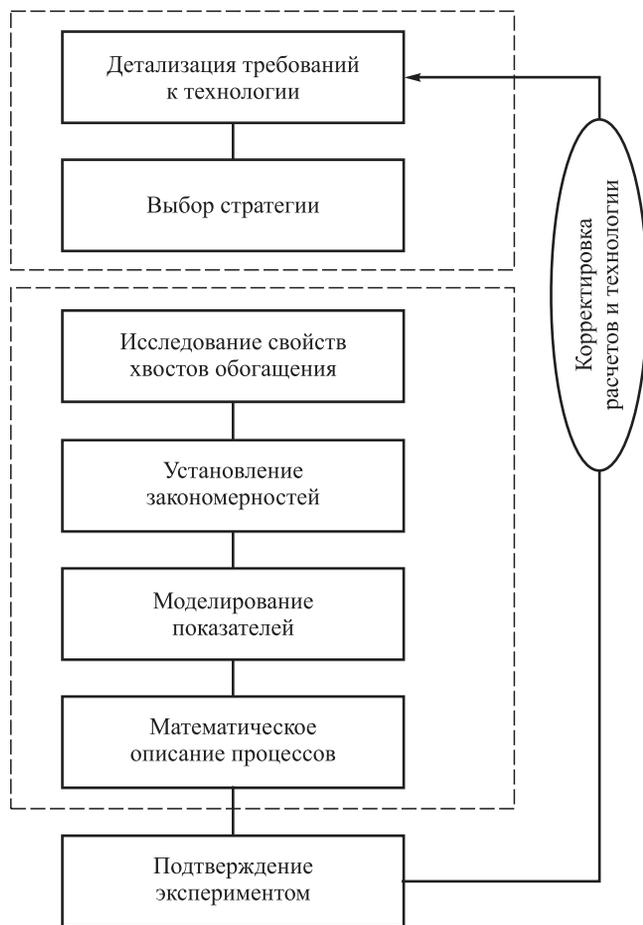


Рис. 1. Алгоритм исследования эффективности выщелачивания

Fig. 1. Algorithm for investigating the leaching effectiveness

- хранение в эксикаторе;
- выщелачивание.

Для дальнейших исследований использовали результаты выщелачивания хвостов обогащения в агитаторе и дезинтеграторе. Выполнен регрессионный анализ экспериментальных данных. Результаты проб сгруппированы и усреднены.



Рис. 2. Способы извлечения металлов из хвостов обогащения

Fig. 2. Methods for extracting metals from the dressing tailings

Результаты агитационного извлечения металлов из неактивированных хвостов представлены в табл. 1, 2.

Зависимость извлечения металла из неактивированных хвостов от содержания реагентов показана на рис. 3.

Зависимость извлечения металла от соотношения переменных факторов показана на рис. 4.

Результаты переработки хвостов обогащения в дезинтеграторе представлены в табл. 3, регрессионный анализ – в табл. 4.

Зависимость извлечения металла из хвостов обогащения от содержания реагентов показана на рис. 5.

Зависимость извлечения металлов от соотношения жидкого и твердого и продолжительности выщелачивания показана на рис. 6.

При содержании в хвостах обогащения 8 % Fe, за один цикл извлекается 1 % Fe, за три – 3 %. Содержание металлов во вторичных хвостах не превышает допустимых значений (табл. 5).

Таблица 1

Матрица планирования и результаты выщелачивания

Table 1. Planning matrix and leaching results

Номер	Содержание, г/л		Соотношение жидкого и твердого	Продолжительность, ч	Извлечение железа, %
	H ₂ SO ₄	NaCl			
1	2 (-1)	160 (1)	4 (-1)	0,25 (-1)	1,7
2	2 (-1)	160 (1)	10 (1)	0,25 (-1)	2,7
3	2 (-1)	160 (1)	4 (-1)	1 (1)	2,8
4	2 (-1)	160 (1)	10 (1)	1 (1)	3,2
5	6 (0)	160 (1)	7 (0)	0,625 (0)	2,9
Диапазон изменения показателя извлечения					1,7 – 3,2
В скобках приведены уровни варьирования переменных факторов.					

Таблица 2

Регрессионный анализ извлечения металлов из неактивированных хвостов

Table 2. Regression analysis of metal extraction from non-activated tailings

Уравнение регрессии	Показатели значимости
$\varepsilon = 2,095 + 1,231X_1 + 0,444X_2 + 0,275X_3 + 0,176X_4 +$ $+ 0,290X_1^2 + 0,330X_2^2 - 0,325X_3^2 + 0,225X_4^2 -$ $- 0,127X_1X_2 + 0,047X_2X_3 + 0,036X_3X_4$	$R^2 = 0,977$ $S_{ad} = 0,0673$ $F = 225,99$

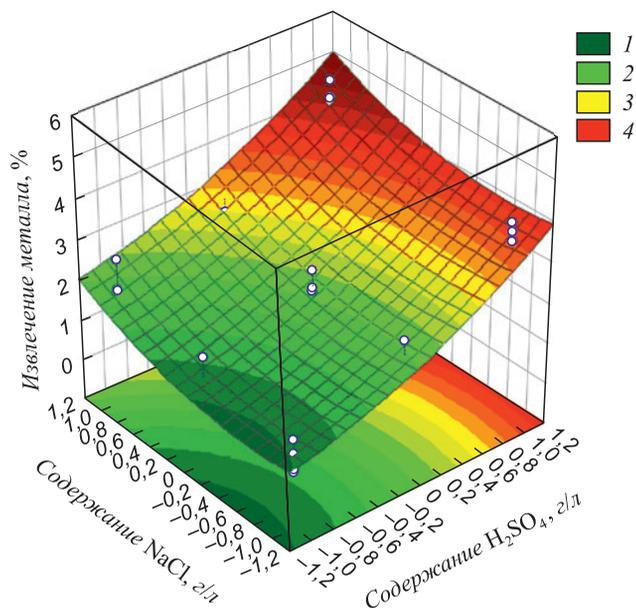


Рис. 3. Зависимость извлечения металла из неактивированных хвостов от содержания реагентов

Fig. 3. Dependence of metal extraction on the reagents content

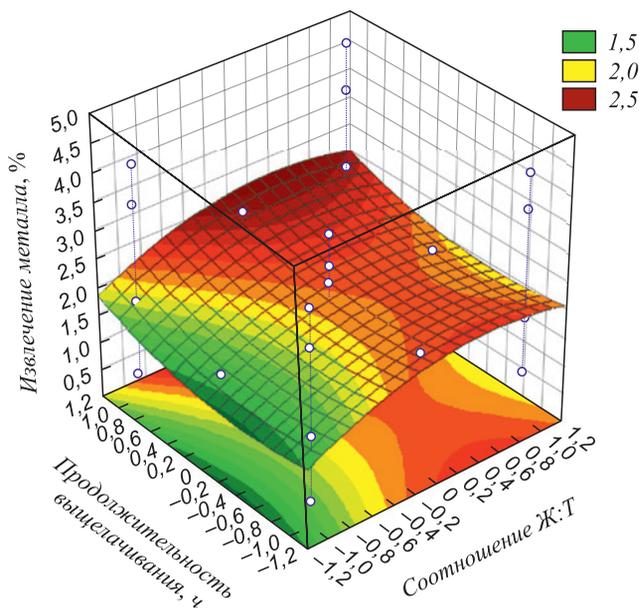


Рис. 4. Зависимость извлечения металла от переменных факторов

Fig. 4. Dependence of metal extraction on variable factors

Таблица 3

Результаты переработки в дезинтеграторе

Table 3. Results of processing in the disintegrator

Номер	Содержание в растворе, г/л		Частота вращения роторов, Гц	Продолжительность, ч	Извлечение железа, %
	H ₂ SO ₄	NaCl			
1	2 (-1)	160 (1)	50 (-1)	0,25 (-1)	2,6
2	2 (-1)	160 (1)	200 (1)	0,25 (-1)	3,2
3	2 (-1)	160 (1)	200 (1)	1 (1)	4,4
4	2 (-1)	160 (0)	125 (0)	0,625 (0)	2,8
5	6 (0)	160 (-1)	125 (0)	0,625 (0)	3,9
Диапазон изменения показателя извлечения					2,6 – 4,4
В скобках приведены уровни варьирования независимых переменных.					

Растворы выщелачивания после извлечения из них железа укрепляются реагентами и используются в дальнейших циклах. По завершению процесса они нейтрализуются по известной технологии.

Остальные металлы в дезинтеграторе так же переводятся в раствор и могут быть выделены в твердый осадок специальными методами гидрометаллургии, которые в данной статье не рассматриваются.

Регрессионный анализ переработки хвостов обогащения в дезинтеграторе

Table 4. Regression analysis of enrichment tailings processing in a disintegrator

Уравнение регрессии	Показатели значимости
$\varepsilon = 3,091 + 2,381X_1 + 1,015X_2 + 0,698X_3 + 0,583X_4 +$ $+ 1,034X_1^2 + 1,104X_2^2 - 0,276X_3^2 - 0,176X_4^2 +$ $+ 0,259X_1X_3 - 0,268X_1X_4 + 0,255X_2X_3 + 0,339X_2X_4 + 0,315X_3X_4$	$R^2 = 0,9384$ $S_{ad} = 1,0111$ $F = 43,03$

Таблица 5

Содержание элементов во вторичных хвостах, %

Table 5. Content of the elements in secondary tailings, %

Химический элемент	Вид выщелачивания		
	агитационное	агитационное после дезинтегратора	в дезинтеграторе
Медь	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$
Никель	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$3,1 \cdot 10^{-3}$
Цинк	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-4}$
Мышьяк	$48 \cdot 10^{-6}$	$48 \cdot 10^{-6}$	$45 \cdot 10^{-6}$
Бериллий	$25 \cdot 10^{-6}$	$18 \cdot 10^{-6}$	$18 \cdot 10^{-6}$
Кобальт	$42 \cdot 10^{-6}$	$40 \cdot 10^{-6}$	$35 \cdot 10^{-6}$
Хром	$47 \cdot 10^{-6}$	$46 \cdot 10^{-6}$	$44 \cdot 10^{-6}$
Молибден	$48 \cdot 10^{-6}$	$45 \cdot 10^{-6}$	$43 \cdot 10^{-6}$
Свинец	$34 \cdot 10^{-6}$	$34 \cdot 10^{-6}$	$31 \cdot 10^{-6}$
Сурьма	$50 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-6}$	$48 \cdot 10^{-6}$
Олово	$55 \cdot 10^{-6}$	$52 \cdot 10^{-6}$	$45 \cdot 10^{-6}$
Стронций	$37 \cdot 10^{-6}$	$37 \cdot 10^{-6}$	$35 \cdot 10^{-6}$
Титан	$48 \cdot 10^{-6}$	$42 \cdot 10^{-6}$	$40 \cdot 10^{-6}$
Ванадий	$52 \cdot 10^{-6}$	$48 \cdot 10^{-6}$	$45 \cdot 10^{-6}$

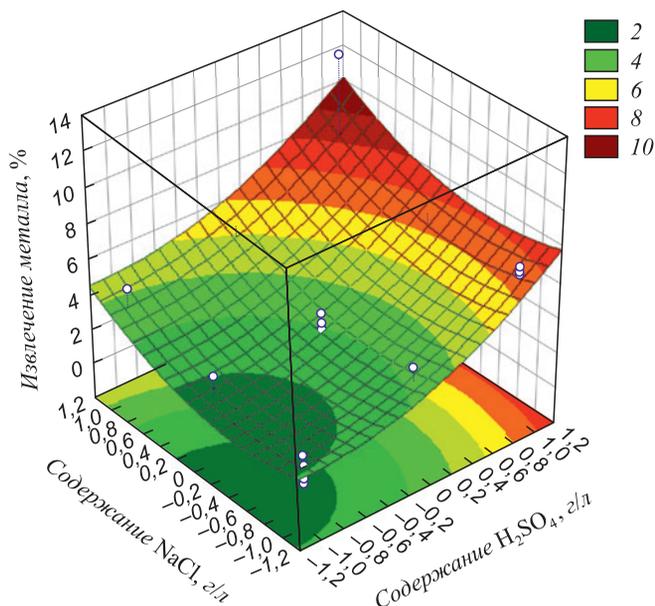


Рис. 5. Зависимость извлечения металла из хвостов обогащения в дезинтеграторе от содержания реагентов

Fig. 5. Dependence of metal extraction from enrichment tailings

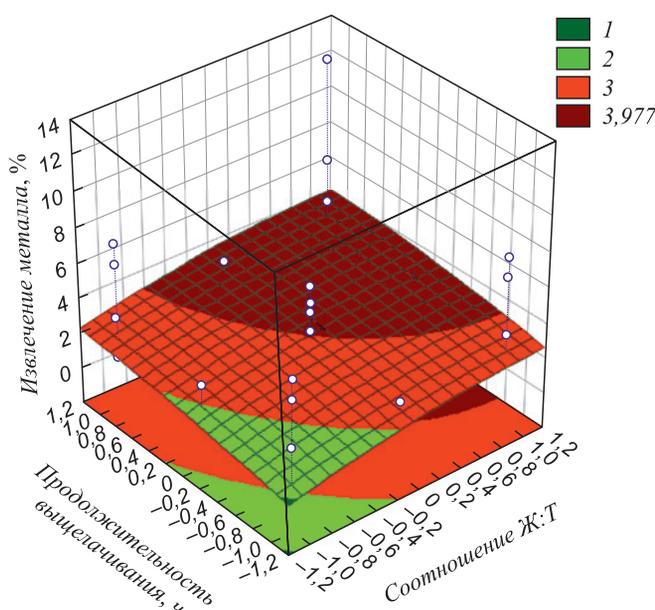


Рис. 6. Зависимость извлечения металла от соотношения факторов

Fig. 6. Dependence of metal extraction on the ratio of factors

Для получения максимального извлечения железа из раствора (4,4 %) рекомендуются следующие параметры:

- содержание в растворе 2 г/л серной кислоты и 160 г/л хлорида натрия;
- частота вращения роторов 200 Гц;
- продолжительность выщелачивания 1 ч.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Среди способов извлечения металлов особое место занимает механоактивация руд, улучшая показатели процессов переработки [12 – 14].

Физико-химическая активность, растворимость и энергия активации минералов зависят от их дисперсности и параметров изменения кристаллической

структуры. При увеличении количества дефектов в кристаллической структуре, она трансформируется в аморфную. Это обусловлено пластической деформацией, локализованной в поверхностном слое, толщиной при сухом измельчении 15 – 20 мкм и при мокром 1,5 – 2 мкм.

В области использования дезинтеграторной техники при производстве железосодержащих продуктов выделяют направления: измельчение губчатого железа, дезинтеграция спеков после обжига, дробление конгломератов промежуточных продуктов и обработка с корректировкой свойств [15 – 16].

Результаты, полученные в процессе экспериментов, находят применение в гидрометаллургических процессах разделения компонентов, в том числе для выщелачивания металлов из руд, повышая извлечение компонентов.

При активации в шаровых и планетарных мельницах эффект достигается за счет увеличения частоты соударения мелющих тел.

Скорость извлечения металлов повышают комбинированием мельниц и химических реакторов, что обеспечивает изменение химических свойств вещества с накоплением свободной энергии. Наибольшее извлечение металла в раствор достигается при минимальной поверхности частиц.

Увеличение скорости извлечения металла при обновлении площади реагирования происходит за счет снятия прореагировавшего слоя и увеличения поверхностной энергии частиц при механоактивации.

Экономическая эффективность безотходной утилизации хвостов обогащения формируется совокупностью стоимости извлеченных металлов, сырья для соседствующих отраслей хозяйства и снижения ущерба окружающей среде от хранения хвостов [17, 18].

Прибыль от утилизации хвостов обогащения определяется соотношением суммы затрат и размеров капитальных вложений.

Выводы

Экспериментально доказана возможность безотходной утилизации хвостов обогащения железистых кварцитов с использованием предложенного алгоритма.

Инженерный прогноз перспектив технологии указывает на целесообразность ее применения за счет вовлечения в производство хвостов первичной переработки металлических руд.

Реализация на практике гидрометаллургических процессов при выщелачивании металлов из бедного сырья нуждается в комплексном совершенствовании процессов его подготовки к переработке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- Голик В.И., Ляшенко В.И. Новые технологии и технические средства для утилизации хвостов обогащения руд // КАЗАНТИП-ЭКО-2016. Инновационные пути решения актуальных проблем базовых отраслей, экологии, энерго- и ресурсосбережения: Сборник трудов XXIV Международной научно-практической конференции, 6 – 10 июня 2016 г., Харьков. Харьков: УкрНТЦ «Энергосталь», 2016. С. 284–297.
- Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects // *Hydrometallurgy*. 2015. Т. 157. P. 306–324. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.08.022>
- Валиев Н.Г., Пропп В.Д., Вандышев А.М. Кафедре горного дела УГГУ – 100 лет // *Известия вузов. Горный журнал*. 2020. № 8. С. 130–143.
- 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>
- Doifode S.K., Matani A.G. Effective industrial waste utilization technologies towards cleaner environment // *International Journal of Chemical and Physical Sciences*. 2015. Vol. 4. P. 536–540.
- Клюев Р.В., Босиков И.И., Майер А.В., Гаврина О.А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2020. № 2. С. 283–290.
- 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. 147–148. P. 223–227. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.05.019>
- Голик В.И. К проблеме охраны окружающей среды российского Донбасса // *Безопасность труда в промышленности*. 2022. № 2. С. 32–38.
- Golik V.I., Lyashenko V.I. New technologies and technical means for utilization of ore dressing tailings. In: *KAZANTIP-ECO-2016. Innovative Ways to solve Urgent Problems of Basic Industries, Ecology, Energy and Resource Saving: Transactions of the XXIV Int. Sci.-Pract. Conf., June 6-10, 2016, Kharkiv*. Kharkiv: UkrNTTs Energostal', 2016, pp. 284–297. (In Russ.).
- Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy*. 2015, vol. 157, pp. 306–324. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.08.022>
- Valiev N.G., Propp V.D., Vandyshv A.M. The 100th Anniversary of the UGSU Chair of Mining. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 2020, no. 8, pp. 130–143. (In Russ.).
- 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>
- Doifode S.K., Matani A.G. Effective industrial waste utilization technologies towards cleaner environment. *International Journal of Chemical and Physical Sciences*. 2015, vol. 4, pp. 536–540.
- Klyuev R.V., Bosikov I.I., Maier A. V., Gavrina O.A. Comprehensive analysis of the use of effective technologies to improve the sustainable development of natural- technical system. *Ustoichivoe razvitie gornyykh territorii*. 2020, no. 2, pp. 283–290. (In Russ.).
- 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. 147–148, pp. 223–227. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.05.019>
- Golik V.I. To the problem of environmental protection of the Russian Donbass. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2022, no. 2, pp. 32–38. (In Russ.).

9. Половов Б.Д., Валиев Н.Г., Кокарев К.В. Особенности имитационного анализа уровней геомеханических рисков горнотехнических объектов // Горный журнал. 2016. № 12. С. 8–13.
10. Hu Z., Wang P., Li J. Ecological restoration of abandoned mine land in China // Journal of Resources and Ecology. 2012. Vol. 3. No. 4. P. 289–296. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2012.04.001>
11. Karimi N.S., Atashpanjeh A., Mollaei F.M.R. Design considerations of heap leaching at Sarcheshmeh copper open pit mine // 17th Int. Mining Congress and Exhibition of Turkey – IMCET 2001. 2001. P. 513–516.
12. Еремеева Ж.В., Шарипзянова Г.Х. Состав диффузионных слоев и влияние типа активатора на структуру получаемых при диффузионном хромосилировании порошковых материалов // Технология металлов. 2007. № 7. С. 35–37.
13. Randolph E., Miller Sh., Miller G. Minimizing acid consumption in mixed oxide/supergene and sulfide heap leach // Proceedings of the 3rd Int. Conf. on Heap Leach Solution. Lima. 2015. P. 36–44.
14. Haverkamp R.G., Kruger D., Rajashekar R. The digestion of New Zealand ilmenite by hydrochloric acid // Hydrometallurgy. 2016. Vol. 163. P. 198–203. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.04.015>
15. Петров Ю.С., Хадзарогова Е.А., Соколов А.А., Шарипзянова Г.Х., Таскин А.В. Основные принципы получения, передачи и хранения информации о параметрах техногенного цикла горно-металлургического предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. № 11–1. С. 178–188. <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-111-0-178-188>
16. 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. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.019>
17. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Пузин В.С., Стась Г.В. Дифференцированная оценка устойчивости обнажений горных пород при подэтажно-камерной системе разработки с закладкой // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2021. № 5. С. 85–93.
18. Wang H., He Y., Duan C., Zhao Y., Tao Y., Ye C. Development of mineral processing engineering education in China University of Mining and Technology // Advances in Intelligent and Soft Computing. 2012. Vol. 141 AISC. P. 77–83. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27948-5_11
9. Polovov B.D., Valiev N.G., Kokarev K.V. Features of simulation analysis of geomechanical risk levels in mines. *Gornyi zhurnal*. 2016, no. 12, pp. 8–10. <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.12.02>
10. Hu Z., Wang P., Li J. Ecological restoration of abandoned mine land in China. *Journal of Resources and Ecology*. 2012, vol. 3, no. 4, pp. 289–296. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2012.04.001>
11. Karimi N.S., Atashpanjeh A., Mollaei F.M.R. Design considerations of heap leaching at Sarcheshmeh copper open pit mine. In: *17th Int. Mining Congress and Exhibition of Turkey — IMCET 2001*. 2001, pp. 513–516.
12. Eremeeva Zh.V., Sharipzyanova G.Kh. Composition of diffusion layers and the effect of activator type on structure of powder materials obtained during diffusion chromosilication. *Tekhnologiya metallov*. 2007, no. 7, pp. 35–37. (In Russ.).
13. Randolph E., Miller Sh., Miller G. Minimizing acid consumption in mixed oxide/supergene and sulfide heap leach. In: *Proceedings of the 3rd Int. Conf. on Heap Leach Solution. Lima*. 2015, pp. 36–44.
14. Haverkamp R.G., Kruger D., Rajashekar R. The digestion of New Zealand ilmenite by hydrochloric acid. *Hydrometallurgy*. 2016, vol. 163, pp. 198–203. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2016.04.015>
15. Petrov Yu.S., Khadzaragova E.A., Sokolov A.A., Sharipzyanova G.Kh., Taskin A.V. Acquisition, transmission and storage of information on production-induced cycle in mining and metallurgy: Outlines. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020, no. 11–1, pp. 178–188. (In Russ.). <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-111-0-178-188>
16. 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. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.019>
17. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Puzin V.S., Stas' G.V. Differentiated assessment of the stability of rock outcrops in a sub-store-chamber processing system with an attel. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2021, no. 5, pp. 85–93. (In Russ.).
18. Wang H., He Y., Duan C., Zhao Y., Tao Y., Ye C. Development of mineral processing engineering education in China University of Mining and Technology. *Advances in Intelligent and Soft Computing*. 2012, vol. 141 AISC, pp. 77–83. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27948-5_11

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); профессор кафедры «Металлургия», Московский политехнический университет

ORCID: 0000-0002-1181-8452

E-mail: vi.golik@mail.ru

Олег Знаурович Габараев, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Горное дело», Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)

E-mail: kafedra-trm@skgmi-gtu.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

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

ORCID: 0000-0002-1181-8452

E-mail: vi.golik@mail.ru

Oleg Z. Gabaraev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair of Mining Engineering, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)

E-mail: kafedra-trm@skgmi-gtu.ru

Yurii I. 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

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

В. И. Голик – научное руководство, формирование выводов.
О. З. Габараев – анализ результатов исследований.
Ю. И. Разоренов – доработка текста.
С. А. Масленников – иллюстрирование текста.

V. I. Golik – scientific guidance, formation of the conclusions.
O. Z. Gabaraev – analysis of the research results.
Yu. I. Razorenov – revision of the text.
S. A. Maslennikov – illustration of the text.

Поступила в редакцию 21.03.2022
После доработки 18.04.2022
Принята к публикации 25.04.2022

Received 21.03.2022
Revised 18.04.2022
Accepted 25.04.2022



Оригинальная статья

УДК 669.15:544.35:546.11:546.74

DOI 10.17073/0368-0797-2022-7-519-525

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2346>



ВАГНЕРОВСКИЙ ПАРАМЕТР ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДОРОДА С НИКЕЛЕМ В ЖИДКОЙ СТАЛИ

Л. А. Большов, С. К. Корнейчук, Э. Л. Большова

Вологодский государственный университет (Россия, 160000, Вологда, ул. Ленина, 15)

Аннотация. К растворам водорода в жидких сплавах системы Fe–Ni применена простейшая модель структуры и межатомного взаимодействия, которая ранее (2019 – 2021) использована авторами для растворов азота в сплавах систем Fe–Cr, Fe–Mn, Fe–Ni, Ni–Co и Ni–Cr. Теория основана на решеточной модели растворов Fe–Ni. Предполагается модельная решетка типа ГЦК. В узлах этой решетки находятся атомы железа и никеля. Атомы водорода располагаются в октаэдрических междоузлиях. Атом водорода взаимодействует лишь с атомами металлов, находящимися в соседних с этим атомом узлами решетки. Это взаимодействие парное. Предполагается, что энергия этого взаимодействия не зависит ни от состава сплава, ни от температуры. Для простоты принимается, что жидкие растворы в системе Fe–Ni являются совершенными. В рамках предложенной теории представлено выражение для вагнеровского параметра взаимодействия водорода с никелем в жидкой стали. Правая часть соответствующей формулы представляет собой функцию отношения констант закона Сиверта для растворимости водорода в жидких железе и никеле. Значения этих констант для температуры 1873 К приняты равными $K'_H(\text{Fe}) = 0,0025$, $K'_H(\text{Ni}) = 0,0040$ % (по массе). При этом получена оценка для вагнеровского параметра взаимодействия водорода с никелем в жидкой стали $\varepsilon_H^{\text{Ni}} = -0,54$. Это соответствует значению лангенберговского параметра взаимодействия $e_H^{\text{Ni}} = -0,002$, что очень близко к экспериментальной оценке $e_H^{\text{Ni}} = -0,0022$.

Ключевые слова: термодинамика, растворы, водород, железо, никель, коэффициент активности, вагнеровский параметр взаимодействия, лангенберговский параметр взаимодействия, закон Сиверта

Для цитирования: Большов Л.А., Корнейчук С.К., Большова Э.Л. Вагнеровский параметр взаимодействия водорода с никелем в жидкой стали // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 7. С. 519–525. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-519-525>

Original article

WAGNER COEFFICIENT OF INTERACTION BETWEEN HYDROGEN AND NICKEL IN LIQUID STEEL

L. A. Bol'shov, S. K. Korneichuk, E. L. Bol'shova

Vologda State University (15 Lenina Str., Vologda 16000, Russian Federation)

Abstract. The simplest model of the structure and interatomic interaction is applied to hydrogen solutions in liquid alloys of Fe–Ni system, which earlier (2019 – 2021) was used by the authors for nitrogen solutions in alloys of Fe–Cr, Fe–Mn, Fe–Ni, Ni–Co and Ni–Cr systems. The theory is based on lattice model of the Fe–Ni solutions. The model assumes a FCC lattice. In the sites of this lattice are the atoms of Fe and Ni. Hydrogen atoms are located in octahedral interstices. The hydrogen atom interacts only with the metal atoms located in the lattice sites neighboring to it. This interaction is pairwise. It is assumed that the energy of this interaction depends neither on the alloy composition nor on the temperature. For simplicity it was assumed that liquid solutions in the Fe–Ni system are perfect. Within the framework of the proposed theory an expression is presented for the Wagner coefficient of interaction between hydrogen and nickel in liquid steel. The right-hand part of the appropriate formula is a function of the ratio of the Sieverts law constants for hydrogen solubility in liquid iron and in liquid nickel. The values of these constants for a temperature of 1873 K are taken equal to $K'_H(\text{Fe}) = 0,0025$, $K'_H(\text{Ni}) = 0,0040$ wt. %. At the same time, an estimate was obtained for the Wagner coefficient of interaction between hydrogen and nickel in liquid steel $\varepsilon_H^{\text{Ni}} = -0,54$. This corresponds to the value of the Langenberg interaction coefficient $e_H^{\text{Ni}} = -0,002$, which is very close to the experimental estimate $e_H^{\text{Ni}} = -0,0022$.

Keywords: thermodynamics, solutions, hydrogen, iron, nickel, activity coefficient, Wagner interaction coefficient, Langenberg interaction coefficient, Sieverts law

For citation: Bol'shov L.A., Korneichuk S.K., Bol'shova E.L. Wagner coefficient of interaction between hydrogen and nickel in liquid steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 7, pp. 519–525. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-7-519-525>

В металлургии стали водород известен как вредный элемент, который должен быть максимально полно удален из жидкого металла. Поэтому возможность теоретического предсказания растворимости водорода в расплаве стали представляет значительный практический интерес. Методы расчета растворимости водорода и азота в многокомпонентных сплавах на основе железа начали развиваться примерно с середины прошлого века. Сначала эти методы относились только к малоконцентрированным сплавам. Они основывались на термодинамической теории многокомпонентных малоконцентрированных сплавов, берущей начало с известной монографии [1]. В этой работе были введены термодинамические параметры взаимодействия между растворенными компонентами сплава, которые в настоящее время часто называют вагнеровскими параметрами взаимодействия. Используя эту идею, Ф. Лангенберг [2] предложил метод расчета растворимости азота в низколегированной жидкой стали. При этом он ввел термодинамические параметры взаимодействия, которые можно назвать лангенберговскими. Попытка преодолеть ограничение малоконцентрированности при расчете растворимости азота в расплаве стали, ограничившись сплавами переходных металлов, была сделана в работах [3, 4]. Исходными величинами для расчета в этих исследованиях являются вагнеровские параметры взаимодействия азота с легирующими переходными металлами в жидких сплавах на основе железа. При этом для вывода расчетных формул необходимо, не ограничиваясь одной лишь феноменологией, использовать модельные представления и к ним применять принципы статистической механики.

Заметим, что помимо подходов, основанных на термодинамических параметрах взаимодействия, существуют и другие подходы к расчету растворимости водорода в жидкой стали. Примером является метод эквивалентных концентраций [5, 6]. Этот подход является менее обоснованным теоретически.

Таким образом, для предсказания растворимости водорода в жидкой стали важно знать значение вагнеровских или лангенберговских параметров взаимодействия водорода с легирующими элементами. Попытки теоретического изучения этого вопроса имели место еще в 60-х годах прошлого века [7]. Они продолжают и в настоящее время [8]. Однако проблема не может считаться исчерпанной. Точность экспериментальных данных по растворимости водорода в жидких металлах и сплавах также оставляет желать лучшего [8]. Целью настоящей работы является теоретическая оценка значений термодинамических параметров взаимодействия первого порядка [9] водорода с никелем в жидкой стали при температуре 1873 К.

Рассмотрим термодинамику жидкого раствора системы Fe–Ni–H. Концентрации компонентов этого раствора, выраженные в мольных долях, обозначим как c_{Fe} ,

c_{Ni} , c_H соответственно. Другой способ выражения этих концентраций, принятый в практической металлургии, это проценты по массе (массовые проценты). Концентрации компонентов рассматриваемого раствора, выраженные в процентах по массе, обозначим как [% Fe], [% Ni], [% H] соответственно. Растворимость газа H_2 при парциальном давлении водорода в газовой фазе P_{H_2} в сплавах системы Fe–Ni обозначим как [% H]*. При $P_{H_2} \rightarrow 0$ имеет место закон Сивертса [10]:

$$[\% H]^* = K'_H \sqrt{\frac{P_{H_2}}{P_0}},$$

где P_0 – стандартное давление ($P_0 = 1 \text{ атм} \approx 0,101 \text{ МПа}$), K'_H – константа закона Сивертса для растворимости водорода в сплавах Fe–Ni. Пусть $K'_H = K'_H(\text{Fe})$ при $c_{Fe} = 1$ и $K'_H = K'_H(\text{Ni})$ при $c_{Ni} = 1$.

Экспериментальные значения $K'_H(\text{Fe})$ для растворимости водорода в жидком железе при абсолютной температуре $T = 1873 \text{ К}$ по данным наиболее известных исследований, опубликованных с 1911 по 1990 г., представлены в табл. 1. Всего в этой таблице показаны данные девятнадцать исследований. Наименьший из приведенных результатов составляет 0,00220 % (по массе), наибольший отвечает значению $K'_H(\text{Fe}) = 0,00279 \text{ %}$ (по массе). Среднее арифметическое значение представленных результатов приходится на $K'_H(\text{Fe}) = 0,00250 \text{ %}$ (по массе). С этим значением совпадают результаты, полученные в работах [23, 24, 26].

Большинство приведенных результатов получены путем измерения растворимости водорода в жидком железе методом Сивертса [10], но в некоторых из цитируемых работ использованы методы закалки образцов и левитационного плавления [26].

В работах [22, 25, 27] приведены обширные литературные данные, относящиеся к периодам с 1911 г. по год опубликования результатов экспериментальных исследований авторов указанных работ. По этим данным легко найти соответствующие средние арифметические значения $K'_H(\text{Fe})$ при 1873 К. Эти значения оказываются равны 0,00249 [22]; 0,00247 [25]; 0,00250 % (по массе) [27].

Согласно справочной информации [30], $K'_H(\text{Fe}) = 0,00246 \text{ %}$ (по массе); по материалам обзорной статьи [31], $K'_H(\text{Fe}) = 0,00242 \text{ %}$ (по массе). Авторы монографии [32] приводят значение $K'_H(\text{Fe}) = 0,00270 \text{ %}$ (по массе). Учитывая все приведенные выше мнения, авторы настоящей работы останавливаются на значении $K'_H(\text{Fe}) = 0,00250 \text{ %}$ (по массе) при $T = 1873 \text{ К}$.

Экспериментальные значения константы закона Сивертса $K'_H(\text{Ni})$ для растворимости водорода в жидком никеле при $T = 1873 \text{ К}$, полученные различными исследователями за период с 1910 по 1990 г., приведены в табл. 2. Всего в этой таблице представлены результаты десяти исследований.

Таблица 1

Экспериментальные значения константы закона Сиверта $K'_H(\text{Fe})$ для растворимости водорода в жидком железе при температуре 1873 К

Table 1. Experimental values of the Sieverts law constant $K'_H(\text{Fe})$ for solubility of hydrogen in liquid iron at a temperature of 1873 K

Исследователи	Год	$K'_H(\text{Fe})$, % (по массе)	Источник
Сивертс, Крумбхар, Юриш	1911	0,00265	[11]
Сивертс, Цафф, Мориц	1938	0,00234	[12]
Лян, Бевер, Флоу	1946	0,00279	[13]
Карнаухов, Морозов	1948	0,00224	[14]
Буш, Дод	1960	0,00268	[15]
де Козинци, Линдберг	1960	0,00254	[16]
Шенк, Вюнш	1961	0,00220	[17]
Маскава, Накагава	1961	0,00237	[18]
Вайнштейн, Эллиот	1963	0,00246	[19]
Бэгшоу, Энгледов, Митчел	1965	0,00249	[20]
Шенк, Ланге	1966	0,00240	[21]
Сомено, Нагасаки, Кадои	1967	0,00246	[22]
Гунжи, Матоба, Оно	1967	0,00250	[23]
Като, Фукуда, Сугияма, Фурукава	1970	0,00250	[24]
Блосси, Пельке	1971	0,00264	[25]
Нгун Нгиа, Явойский, Костерев, Афанасьев	1972	0,00250	[26]
Бурштейн, Пельке	1974	0,00249	[27]
Бестер, Ланге	1977	0,00254	[28]
Митра, Ланге	1990	0,00267	[29]

Наименьшее из представленных значений составляет $K'_H(\text{Ni}) = 0,00363\%$ (по массе), наибольшее – $K'_H(\text{Ni}) = 0,00448\%$ (по массе). Среднее арифметическое значение представленных результатов составляет $K'_H(\text{Ni}) = 0,00404\%$ (по массе). В монографии [37] рекомендуется значение $K'_H(\text{Ni}) = 0,00407\%$ (по массе), в монографии [32] – $K'_H(\text{Ni}) = 0,00423\%$ (по массе). Авторы настоящей работы останавливаются на значении $K'_H(\text{Ni}) = 0,00400\%$ (по массе) при $T = 1873\text{ K}$.

Следует отметить попытку теоретического вычисления растворимости водорода в чистых жидких металлах [38]. Обсуждение этой попытки выходит за рамки настоящей работы.

Далее рассмотрим термодинамику растворов водорода в жидких сплавах системы Fe–Ni.

Пусть a_H – термодинамическая активность водорода в жидком растворе; $\gamma_H = \frac{a_H}{c_H}$ – коэффициент актив-

ности водорода, иногда называемый рациональным коэффициентом активности; $f_H = \frac{a_H}{[\% \text{ H}]}$ – массово-про-

центный коэффициент активности водорода. Рассмотрим термодинамические параметры взаимодействия первого порядка водорода с никелем в жидкой стали:

$$\varepsilon_H^{\text{Ni}} = \frac{\partial \ln \gamma_H}{\partial c_{\text{Ni}}} \text{ при } c_{\text{Fe}} \rightarrow 1;$$

$$e_H^{\text{Ni}} = \frac{\partial \lg f_H}{\partial [\% \text{ Ni}]} \text{ при } [\% \text{ Fe}] \rightarrow 100.$$

Параметр $\varepsilon_H^{\text{Ni}}$ называется вагнеровским параметром взаимодействия [1], e_H^{Ni} можно назвать лангенберговским параметром взаимодействия [2]. Между вагнеровским и лангенберговским параметрами взаимодействия установлено [39] соотношение:

$$\varepsilon_H^{\text{Ni}} = 230,3 \frac{A_{\text{Ni}}}{A_{\text{Fe}}} e_H^{\text{Ni}} + \frac{A_{\text{Fe}} - A_{\text{Ni}}}{A_{\text{Fe}}}, \quad (1)$$

где A_{Fe} и A_{Ni} – атомные массы соответствующих элементов, $230,3 \approx 100 \ln 10$. Соотношение, обратное уравнению (1), запишется в виде:

$$e_H^{\text{Ni}} = \frac{1}{230,3} \frac{A_{\text{Fe}}}{A_{\text{Ni}}} \left(\varepsilon_H^{\text{Ni}} - \frac{A_{\text{Fe}} - A_{\text{Ni}}}{A_{\text{Fe}}} \right). \quad (2)$$

Далее предлагается простая теория термодинамических свойств жидких растворов водорода в сплавах системы Fe–Ni. Эта теория полностью аналогична теории для жидких растворов азота в сплавах системы

Таблица 2

Экспериментальные значения константы закона Сиверта $K'_H(\text{Ni})$ для растворимости водорода в жидком никеле при температуре 1873 К

Table 2. Experimental values of the Sieverts law constant $K'_H(\text{Ni})$ for solubility of hydrogen in liquid nickel at a temperature of 1873 K

Исследователи	Год	$K'_H(\text{Ni})$, % (по массе)	Источник
Сивертс, Крумбхар	1910	0,00387	[33]
Буш, Дод	1960	0,00382	[15]
де Козинци, Линдберг	1960	0,00391	[16]
Шенк, Вюнш	1961	0,00363	[17]
Вайнштейн, Эллиот	1963	0,00410	[34]
Бэгшоу, Митчел	1966	0,00378	[35]
Шенк, Ланге	1966	0,00426	[21]
Ланге, Шенк	1969	0,00420	[36]
Блосси, Пельке	1971	0,00448	[25]
Митра, Ланге	1990	0,00437	[29]

Fe–Cr [40]. Теория основана на решеточной модели растворов Fe–Ni. Предполагается модельная решетка типа ГЦК. В узлах этой решетки располагаются атомы железа и никеля. Атомы водорода располагаются в октаэдрических междоузлиях. Атом водорода взаимодействует лишь с атомами металлов, находящимися в соседних с этим атомом узлах решетки. Это взаимодействие парное. Предполагается, что энергия этого взаимодействия не зависит ни от состава сплава, ни от температуры. Для простоты принимается, что жидкие растворы в системе Fe–Ni являются совершенными. Будем учитывать лишь конфигурационную составляющую энтропии сплава. Сформулированную модель рассматриваем методами статистической механики. Пользуясь результатами работы [40], для рассматриваемой модели имеем:

$$K'_H(\text{Ni}) = K'_H(\text{Fe}) \frac{A_{\text{Fe}}}{A_{\text{Ni}}} \left(1 - \frac{1}{6} \varepsilon_{\text{H}}^{\text{Ni}}\right)^6 \quad (3)$$

Решение уравнения (3) относительно параметра взаимодействия $\varepsilon_{\text{H}}^{\text{Ni}}$ имеет вид:

$$\varepsilon_{\text{H}}^{\text{Ni}} = 6 \left(1 - \sqrt[6]{\frac{A_{\text{Ni}} K'_H(\text{Ni})}{A_{\text{Fe}} K'_H(\text{Fe})}}\right) \quad (4)$$

Подставим в правую часть формулы (4) значения: $K'_H(\text{Fe}) = 0,0025\%$ (по массе); $K'_H(\text{Ni}) = 0,0040\%$ (по массе); $A_{\text{Fe}} = 55,847$; $A_{\text{Ni}} = 58,71$.

Получим: $\varepsilon_{\text{H}}^{\text{Ni}} = -0,54$ для $T = 1873$ К. Тогда формула (2) дает значение $e_{\text{H}}^{\text{Ni}} = -0,0020$.

Обратимся к эксперименту. Экспериментальные значения лангенберговского параметра взаимодействия e_{H}^{Ni} в жидкой стали при $T = 1873$ К, полученные различными исследователями за период с 1960 по 1972 г., представлены в табл. 3. Всего в этой таблице приведены результаты девяти исследований. Наименьший по абсолютному значению результат составляет $e_{\text{H}}^{\text{Ni}} = 0$, наибольший – $e_{\text{H}}^{\text{Ni}} = -0,0024$. Среднее арифметическое цитируемых результатов приходится на $e_{\text{H}}^{\text{Ni}} = -0,0013$. Это же значение рекомендовано в монографии [37]. Однако, по мнению авторов, первые четыре результата в табл. 3 следует рассматривать как предварительные. Среднее арифметическое последних пяти значений составляет $e_{\text{H}}^{\text{Ni}} = -0,0022$.

В работе [5] логарифм коэффициента активности водорода ($\lg f_{\text{H}}$), растворенного в жидком бинарном сплаве системы Fe– j (j – легирующий элемент), описывается эмпирической формулой, выражающей зависимость $\lg f_{\text{H}}$ от температуры T и концентрации легирующего элемента. Из этой формулы в работе [42] были определены значения вагнеровского параметра взаимодействия ε_{H}^j водорода с легирующим элементом j в жидкой стали при $T = 1873$ К. При этом получилось $\varepsilon_{\text{H}}^{\text{Ni}} = -0,54$. Согласно формуле (2), этому значению отвечает значение лангенберговского параметра взаимодействия

$e_{\text{H}}^{\text{Ni}} = -0,0020$. В работе [42] показано, что данные [5] хорошо отвечают теории по температурной зависимости вагнеровских параметров взаимодействия ε_{H}^j в жидкой стали [42], где j – переходный металл.

Принимая во внимание все отмеченные моменты, наиболее правдоподобным экспериментальным значением параметра взаимодействия e_{H}^{Ni} в жидкой стали при $T = 1873$ К следует признать $e_{\text{H}}^{\text{Ni}} = -0,0022$. Этому соответствует величина вагнеровского параметра взаимодействия $\varepsilon_{\text{H}}^{\text{Ni}} = -0,55$, что практически совпадает со значением, полученным теоретически в настоящей работе.

В работе [40] формула (3) получается из более общего уравнения для концентрационной зависимости константы закона Сивертса в жидких сплавах системы Fe– j . Для растворов водорода в сплавах системы Fe–Ni общее уравнение запишется в виде:

$$K'_H = K'_H(\text{Fe}) \frac{A_{\text{Fe}}}{A_m} \left(1 - \frac{1}{6} \varepsilon_{\text{H}}^{\text{Ni}} c_{\text{Ni}}\right)^6 \quad (5)$$

где $A_m = A_{\text{Fe}}(1 - c_{\text{Ni}}) + A_{\text{Ni}}c_{\text{Ni}}$.

Подставим в уравнение (5) значение $K'_H(\text{Fe}) = 0,0025\%$ (по массе) и $\varepsilon_{\text{H}}^{\text{Ni}} = -0,54$. График полученной функции $K'_H(c_{\text{Ni}})$ представлен на рисунке. Там же показана экспериментальная кривая, отвечающая данным работы [29]. Функция $K'_H(c_{\text{Ni}})$ монотонно возрастает. Ее график обращен выпуклостью вниз.

Очевидно, что кривые, отвечающие теории и эксперименту, очень близки друг другу. Существенное отличие имеет место лишь вблизи концентраций никеля $c_{\text{Ni}} = 0$ и $c_{\text{Ni}} = 1$.

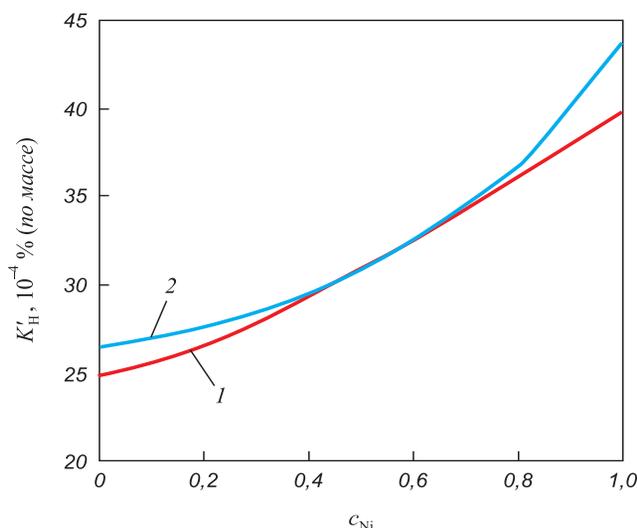
В заключение отметим следующий момент, касающийся применимости формул (3) и (4). Аналогичное

Таблица 3

Экспериментальные значения лангенберговского параметра взаимодействия e_{H}^{Ni} в жидкой стали при температуре 1873 К

Table 3. Experimental values of the Langenberg interaction coefficient e_{H}^{Ni} in liquid steel at a temperature of 1873 K

Исследователи	Год	e_{H}^{Ni}	Источник
Буш, Дод	1960	-0,0002	[15]
де Казинци, Линдберг	1960	-0,0007	[16]
Шенк, Вюнш	1961	-0,0008	[17]
Вайнштейн, Эллиот	1963	0	[34]
Гунжи, Оно, Аоки	1964	-0,0020	[41]
Сомено, Нагасаки, Кадои	1967	-0,0024	[22]
Като, Фукуда, Сугияма, Фурукава	1970	-0,0024	[24]
Блосси, Пельке	1971	-0,0019	[25]
Нгуен Нгиа, Явойский, Костерев, Афанасьев	1972	-0,0023	[26]



Константа закона Сиверта для растворимости водорода в сплавах Fe–Ni при $T = 1873$ К:

1 – теория, уравнение (5); 2 – эксперимент [29]

Sieverts law constant for hydrogen solubility in Fe–Ni alloys at $T = 1873$ K:

1 – theory, formula (5); 2 – experiment [29]

замечание было сделано в работе [43] по отношению к растворам азота в жидких сплавах системы Fe–Ni. Для простоты в настоящем исследовании было принято допущение, что жидкие растворы системы Fe–Ni являются совершенными. Однако вагнеровский параметр взаимодействия $\varepsilon_{\text{Ni}}^{\text{Ni}}$ в жидких сплавах на основе железа, оцененный по экспериментальным данным [44] в работе [45], оказался равным $\varepsilon_{\text{Ni}}^{\text{Ni}} = 1,7$. Это указывает на существенные отклонения от закона Генри в рассматриваемой системе. В работе [43] указывается, что для применимости формул типа (3) важна не идеальность растворов системы Fe–Ni, а лишь равенство нулю избыточной энтропии этих растворов. Поэтому требование идеальности растворов Fe–Ni может быть заменено требованием регулярности или субрегулярности [46] таких растворов.

Выводы

Предложена теория, которая предсказывает значение вагнеровского параметра взаимодействия $\varepsilon_{\text{H}}^{\text{Ni}} = -0,54$ в жидкой стали при температуре 1873 К. Это совпадает с экспериментальным значением [41].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Вагнер К. Термодинамика сплавов. Москва: Metallurgizdat, 1957. 179 с.
2. Langenberg F.C. Predicting solubility of nitrogen in molten steel // *Journal of Metals*. 1956. Vol. 8. No. 8. P. 1099–1101.
3. Большов Л.А. О растворимости азота в жидких многокомпонентных сплавах железа с переходными металлами // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1982. № 1. С. 8–10.
4. Большов Л.А. Статистическая теория многокомпонентных и малоцентрированных сплавов: Диссертация ... доктора физико-математических наук. Москва: МГУ, 1991. 496 с.
5. Schürmann E., Kättlitz W. Äquivalente Wirkung der Legierungselemente auf die konzentrations- und temperaturabhängige Wasserstofflöslichkeit in eisenreichen Drei- und Mehrstoffschmelzen // *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1981. Vol. 52. No. 8. P. 295–301.
6. Apa L. Solubility of hydrogen in nickel, cobalt and their alloys calculated by the alloying element equivalence method. Comparison with solubility in iron alloys // *Metalurgia (Bucharest)*. 1988. Vol. 40. No. 5. P. 236–242.
7. Бурyleв Б.П. Растворимость водорода в жидких сплавах железа // *Известия вузов. Черная металлургия*. 1965. № 2. С. 17–23.
8. Jiang G.-R., Li Y.-X., Liu Y. Calculation of hydrogen solubility in molten alloys // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2011. Vol. 21. No. 5. P. 1130–1135. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)60832-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60832-7)
9. Люпис К. Химическая термодинамика материалов. Москва: Металлургия, 1989. 504 с.
10. Sieverts A. Zur Kenntnis der Okklusion und Diffusion von Gasen durch Metalle // *Zeitschrift für physikalische Chemie*. 1907. Vol. 60. No. 2. P. 129–201. <https://doi.org/10.1515/zpch-1907-6009>
11. Sieverts A. Die Löslichkeit von Wasserstoff in Kupfer, Eisen und Nickel // *Zeitschrift für physikalische Chemie*. 1911. Vol. 77. No. 5. P. 591–613. <https://doi.org/10.1515/zpch-1911-7737>
12. Sieverts A., Zapf G., Moritz H. Die Löslichkeit von Wasserstoff, Deuterium und Stickstoff in Eisen // *Zeitschrift für physikalische Chemie*. 1938. Vol. A183. No. 1. P. 19–37. <https://doi.org/10.1515/zpch-1939-18304>
1. Wagner C. *Thermodynamics of Alloys*. Cambridge: Addison-Wesley Press, 1952, 162 p. (Russ. ed.: Vagner K. *Termodinamika splavov*. Moscow: Metallurgiya, 1957, 179 p.).
2. Langenberg F.C. Predicting solubility of nitrogen in molten steel. *Journal of Metals*. 1956, vol. 8, no. 8, pp. 1099–1101.
3. Bol'shov L.A. On solubility of nitrogen in liquid multicomponent iron alloys with transition metals. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1982, no. 1, pp. 8–10. (In Russ.).
4. Bol'shov L.A. *Statistical theory of multicomponent and low-concentration alloys: Dr. Phys.-Math. Sci. Diss.* Moscow: 1991, 496 p. (In Russ.).
5. Schürmann E., Kättlitz W. Äquivalente Wirkung der Legierungselemente auf die konzentrations- und temperaturabhängige Wasserstofflöslichkeit in eisenreichen Drei- und Mehrstoffschmelzen. *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1981, vol. 52, no. 8, pp. 295–301. (In Germ.).
6. Apa L. Solubility of hydrogen in nickel, cobalt and their alloys calculated by the alloying element equivalence method. Comparison with solubility in iron alloys. *Metalurgia (Bucharest)*. 1988, vol. 40, no. 5, pp. 236–242. (In Romanian).
7. Burylev B.P. Solubility of hydrogen in liquid iron alloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1965, no. 2, pp. 17–23. (In Russ.).
8. Jiang G.-R., Li Y.-X., Liu Y. Calculation of hydrogen solubility in molten alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2011, vol. 21, no. 5, pp. 1130–1135. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(11\)60832-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(11)60832-7)
9. Lupis C.H.P. *Chemical Thermodynamics of Materials*. New York: North Holland, 1983, 581 p. (Russ. ed.: Lupis K. *Khimicheskaya termodinamika materialov*. Moscow: Metallurgiya, 1989, 503 p.).
10. Sieverts A. Zur Kenntnis der Okklusion und Diffusion von Gasen durch Metalle. *Zeitschrift für physikalische Chemie*. 1907, vol. 60, no. 2, pp. 129–201. (In Germ.). <https://doi.org/10.1515/zpch-1907-6009>
11. Sieverts A. Die Löslichkeit von Wasserstoff in Kupfer, Eisen und Nickel. *Zeitschrift für physikalische Chemie*. 1911, vol. 77, no. 5, pp. 591–613. (In Germ.). <https://doi.org/10.1515/zpch-1911-7737>
12. Sieverts A., Zapf G., Moritz H. Die Löslichkeit von Wasserstoff, Deuterium und Stickstoff in Eisen. *Zeitschrift für physikalische Chemie*. 1938, vol. A183, no. 1, pp. 19–37. (In Germ.). <https://doi.org/10.1515/zpch-1939-18304>

13. Liang H., Bever M.B., Floe C.F. The solubility of hydrogen in molten iron-silicon alloys // *Transactions of AIME*. 1946. Vol. 167. No. 2. P. 395–403.
14. Карнауков М.М., Морозов А.Н. Растворимость водорода в жидком железе и его сплавах с титаном, ниобием и танталом // *Известия АН СССР. Отделение технических наук (ОТН)*. 1948. № 12. С. 1845–1855.
15. Busch T., Dodd R.A. The solubility of hydrogen and nitrogen in liquid alloys of iron, nickel and cobalt // *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1960. Vol. 218. No. 3. P. 488–491.
16. De Kazinczy F., Lindberg O. Solubility of hydrogen in Fe-Ni and Fe-Cr alloys at 1400 and 1600 °C // *Jernkontorets Annaler*. 1960. Vol. 144. No. 4. P. 288–296.
17. Schenck H., Wunsch H. Über die Gleichgewichtslöslichkeit des Wasserstoffs im flüssigen reinen Nickel und Eisen und die Beeinflussung im Eisen durch Sauerstoff // *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1961. Vol. 32. No. 11. P. 779–790.
18. Maekawa S., Nakagawa Y. The solubility of hydrogen in liquid iron and iron alloys. Report 1 // *Research Reports of the Japan Steel Works, Ltd*. March 1, 1961, 20 p.
19. Weinstein M., Elliott J.F. Solubility of hydrogen in liquid iron alloys // *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1963. Vol. 227. No. 2. P. 382–393.
20. Bagshaw T., Engledow D., Mitchell A. Solubility of hydrogen in some liquid iron-based alloys // *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1965. Vol. 203. No. 2. P. 160–165.
21. Schenck H., Lange K.W. Untersuchungen über die Wasserstofflöslichkeit in Fe, Ni, Co, Cu und deren binären Nickellegierungen // *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1966. Vol. 37. No. 9. P. 738–748.
22. Someno M., Nagasaki K., Kadoi K. Solubility of hydrogen in liquid iron and some binary iron alloys // *Nippon kinzoku gakkai-shi*. 1967. Vol. 31. No. 6. P. 729–734.
23. Gunji K., Matoba S., Ono K. Measurement of hydrogen solubility in liquid iron alloys // *Nippon kinzoku gakkai-shi*. 1967. Vol. 31. No. 1. P. 51–64.
24. Kato E., Fukuda Sh., Sugiyama T., Furukawa T. Solubility of hydrogen in liquid iron alloys // *Tetsu-to-Nagane*. 1970. Vol. 56. No. 5. P. 521–535.
25. Blossey R.G., Pehlke R.D. Solubility of hydrogen in liquid Fe-Co-Ni alloys // *Metallurgical Transactions*. 1971. Vol. 2. No. 11. P. 3157–3161.
26. Нгуен Нгиа, Явоиский В.И., Костерев Л.Б., Афанасьев М.И. Растворимость водорода в бинарных расплавах на основе железа // *Известия АН СССР. Металлы*. 1972. № 4. С. 18–23.
27. Boorstein W.M., Pehlke R.D. Measurement of hydrogen solubility in liquid iron alloys employing a constant volume technique // *Metallurgical Transactions*. 1974. Vol. 5. No. 2. P. 399–405. <https://doi.org/10.1007/BF02644107>
28. Bester H., Lange K.W. Wasserstofflöslichkeit in Eisen und flüssigen Eisen-, Mangan-, Chrom- und Siliziumlegierungen // *Stahl und Eisen*. 1977. Vol. 97. No. 21. P. 1037–1039.
29. Mitra M., Lange K.W. Experimental studies on hydrogen solubility in liquid ternary iron-nickel-chromium alloys // *Steel Research*. 1990. Vol. 61. No. 8. P. 353–358. <https://doi.org/10.1002/srin.199000361>
30. Эллиот Дж.Ф., Глейзер М., Рамакришна В. Термохимия сталеплавильных процессов. Москва: Металлургия, 1969. 252 с.
31. Sigworth G.K., Elliott J.F. The thermodynamics of liquid iron alloys // *Metal Science*. 1974. Vol. 8. No. 1. P. 298–310.
32. Григорян В.А., Белянчиков Л.Н., Стомахин А.Я. Теоретические основы электросталеплавильных процессов. Москва: Металлургия, 1987. 272 с.
33. Sieverts A., Krumbhaar W. Über die Löslichkeit von Gasen in Metallen und Legierungen // *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft*. 1910. Vol. 43. No. 1. P. 893–900. <https://doi.org/10.1002/cber.191004301152>
13. Liang H., Bever M.B., Floe C.F. The solubility of hydrogen in molten iron-silicon alloys. *Transactions of AIME*. 1946, vol. 167, no. 2, pp. 395–403.
14. Karnaukhov M.M., Morozov A.N. Solubility of hydrogen in liquid iron and its alloys with titanium, niobium and tantalum. *Izvestiya AN SSSR. Otdeleniye tekhnicheskikh nauk (OTN)*. 1948, no. 12, pp. 1845–1855. (In Russ.).
15. Busch T., Dodd R. A. The solubility of hydrogen and nitrogen in liquid alloys of iron, nickel and cobalt. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1960, vol. 218, no. 3, pp. 488–491.
16. De Kazinczy F., Lindberg O. Solubility of hydrogen in Fe-Ni and Fe-Cr alloys at 1400 and 1600 °C. *Jernkontorets Annaler*. 1960, vol. 144, no. 4, pp. 288–296.
17. Schenck H., Wunsch H. Über die Gleichgewichtslöslichkeit des Wasserstoffs im flüssigen reinen Nickel und Eisen und die Beeinflussung im Eisen durch Sauerstoff. *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1961, vol. 32, no. 11, pp. 779–790. (In Germ.).
18. Maekawa S., Nakagawa Y. The solubility of hydrogen in liquid iron and iron alloys. Report 1. *Research Reports of the Japan Steel Works, Ltd*. March 1, 1961, 20 p.
19. Weinstein M., Elliott J.F. Solubility of hydrogen in liquid iron alloys. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1963, vol. 227, no. 2, pp. 382–393.
20. Bagshaw T., Engledow D., Mitchell A. Solubility of hydrogen in some liquid iron-based alloys. *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1965, vol. 203, no. 2, pp. 160–165.
21. Schenck H., Lange K.W. Untersuchungen über die Wasserstofflöslichkeit in Fe, Ni, Co, Cu und deren binären Nickellegierungen. *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1966, vol. 37, no. 9, pp. 738–748. (In Germ.).
22. Someno M., Nagasaki K., Kadoi K. Solubility of hydrogen in liquid iron and some binary iron alloys. *Nippon kinzoku gakkai-shi*. 1967, vol. 31, no. 6, pp. 729–734. (In Jap.).
23. Gunji K., Matoba S., Ono K. Measurement of hydrogen solubility in liquid iron alloys. *Nippon kinzoku gakkai-shi*. 1967, vol. 31, no. 1, pp. 51–64. (In Jap.).
24. Kato E., Fukuda Sh., Sugiyama T., Furukawa T. Solubility of hydrogen in liquid iron alloys. *Tetsu-to-Hagane*. 1970, vol. 56, no. 5, pp. 521–535. (In Jap.).
25. Blossey R.G., Pehlke R.D. Solubility of hydrogen in liquid Fe-Co-Ni alloys. *Metallurgical Transactions*. 1971, vol. 2, no. 11, pp. 3157–3161.
26. Nguen Ngia, Yavoiskii V.I., Kosterev L.B., Afanas'ev M.I. Solubility of hydrogen in binary iron-based melts. *Izvestiya AN SSSR. Metallurgy*. 1972, no. 4, pp. 18–23. (In Russ.).
27. Boorstein W.M., Pehlke R.D. Measurement of hydrogen solubility in liquid iron alloys employing a constant volume technique. *Metallurgical Transactions*. 1974, vol. 5, no. 2, pp. 399–405. <https://doi.org/10.1007/BF02644107>
28. Bester H., Lange K.W. Wasserstofflöslichkeit in Eisen und flüssigen Eisen-, Mangan-, Chrom- und Siliziumlegierungen. *Stahl und Eisen*. 1977, vol. 97, no. 21, pp. 1037–1039. (In Germ.).
29. Mitra M., Lange K.W. Experimental studies on hydrogen solubility in liquid ternary iron-nickel-chromium alloys. *Steel Research*. 1990, vol. 61, no. 8, pp. 353–358. <https://doi.org/10.1002/srin.199000361>
30. Elliott J.F., Gleiser M., Ramakrishna V. *Thermochemistry for Steelmaking*. Vol. 2. Reading MA-Palo Alto-London: Addison-Wesley Publ. Co., 1963. (Russ ed.: Elliot J.F., Gleiser M., Ramakrishna V. *Termokhimiya staleplavil'nykh protsessov*. Moscow: Metallurgiya, 1969, 252 p.)
31. Sigworth G.K., Elliott J.F. The thermodynamics of liquid iron alloys. *Metal Science*. 1974, vol. 8, no. 1, pp. 298–310.
32. Grigoryan V.A., Belyanchikov L.N., Stomakhin A.Ya. *Theoretical Fundamentals of Electric Steelmaking Processes*. Moscow: Metallurgiya, 1987, 272 p. (In Russ.).
33. Sieverts A., Krumbhaar W. Über die Löslichkeit von Gasen in Metallen und Legierungen. *Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft*. 1910, vol. 43, no. 1, pp. 893–900. (In Germ.). <https://doi.org/10.1002/cber.191004301152>

34. Weinstein M., Elliott J.F. The solubility of hydrogen in liquid pure metals: cobalt, chromium, copper and nickel // Transactions of the Metallurgical Society of AIME. 1963. Vol. 227. No. 1. P. 285–291.
35. Bagshaw T., Mitchell A. Solubility of hydrogen in some alloys of nickel // Journal of the Iron and Steel Institute. 1966. Vol. 204. No. 2. P. 87–90.
36. Lange K.W., Schenck H. Wasserstofflöslichkeit in Ni-Mo und Ni-W Legierungen // Zeitschrift für Metallkunde. 1969. Vol. 60. No. 1. P. 62–68.
37. Линчевский Б.В. Термодинамика и кинетика взаимодействия газов с жидкими металлами. Москва: Metallurgiya, 1986. 224 с.
38. Emi T., Pehlke R.D. Theoretical calculation of the solubility of hydrogen in liquid metals // Metallurgical Transactions. 1970. Vol. 1. No. 10. P. 2733–2747. <https://doi.org/10.1007/BF03037808>
39. Lupis C.H.P., Elliott J.F. The relation between interaction coefficients ϵ and e // Transactions of the Metallurgical Society of AIME. 1965. Vol. 233. No. 1. P. 257–258.
40. Большов Л.А., Корнейчук С.К. Термодинамика жидких растворов азота в хроме // Известия вузов. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 5. С. 387–393. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-5-387-393>
41. Gunji K., Ono K., Aoki Y. The effect of various elements on the solubility of hydrogen in liquid iron // Nippon kinzoku gakkishi. 1964. Vol. 28. No. 1. P. 64–68.
42. Большов Л.А. Термодинамика растворов водорода в жидких сплавах железа с переходными металлами // Журнал физической химии. 1997. Т. 71. №. 10. С. 1902–1903.
43. Большов Л.А., Корнейчук С.К., Большова Э.Л. Термодинамика растворов азота в жидком никеле // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 3. С. 200–204. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-200-204>
44. Hultgren R., Desai P.D., Hawkins D.T., Gleiser M., Kelley K.K. Selected values of thermodynamic properties of binary alloys. Metals Park, Ohio: ASFM, 1973. 1435 p.
45. Большов Л.А., Корнейчук С.К. Значения термодинамических параметров взаимодействия в жидких бинарных сплавах // Известия вузов. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 9. С. 713–718. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-713-718>
46. Hardy H.K. A “subregular” solution model and its application to some binary alloy systems // Acta Metallurgica. 1953. Vol. 1. No. 1. P. 202–210.
34. Weinstein M., Elliott J.F. The solubility of hydrogen in liquid pure metals: cobalt, chromium, copper and nickel. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1963, vol. 227, no. 1, pp. 285–291.
35. Bagshaw T., Mitchell A. Solubility of hydrogen in some alloys of nickel. *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1966, vol. 204, no. 2, pp. 87–90.
36. Lange K.W., Schenck H. Wasserstofflöslichkeit in Ni-Mo- und Ni-W-Legierungen. *Zeitschrift für Metallkunde*. 1969, vol. 60, no. 1, pp. 62–68. (In Germ.).
37. Linchevskii B.V. *Thermodynamics and Kinetics of Interaction of Gases with Liquid Metals*. Moscow: Metallurgiya. 1986, 224 p. (In Russ.).
38. Emi T., Pehlke R.D. Theoretical calculation of the solubility of hydrogen in liquid metals. *Metallurgical Transactions*. 1970, vol. 1, no. 10, pp. 2733–2747. <https://doi.org/10.1007/BF03037808>
39. Lupis C.H.P., Elliott J.F. The relation between interaction coefficients ϵ and e . *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1965, vol. 233, no. 1, pp. 257–258.
40. Bol'shov L.A., Korneichuk S.K. Thermodynamics of liquid nitrogen solutions in chromium. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 5, pp. 387–393. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-5-387-393>
41. Gunji K., Ono K., Aoki Y. The effect of various elements on the solubility of hydrogen in liquid iron. *Nippon kinzoku gakkishi*. 1964, vol. 28, no. 1, pp. 64–68. (In Jap.).
42. Bol'shov L.A. Thermodynamics of solutions of hydrogen in liquid alloys of iron with transition metals. *Zhurnal fizicheskoi khimii*. 1997, vol. 71, no. 10, pp. 1902–1903. (In Russ.).
43. Bol'shov L.A., Korneichuk S.K., Bol'shova E.L. Thermodynamics of nitrogen solutions in liquid nickel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 3, pp. 200–204. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-3-200-204>
44. Hultgren R., Desai P.D., Hawkins D.T., Gleiser M., Kelley K.K. *Selected Values of Thermodynamic Properties of Binary Alloys*. Metals Park, Ohio: ASFM, 1973, 1435 p.
45. Bol'shov L.A., Korneichuk S.K. Thermodynamic interaction coefficients in low-concentrated liquid binary alloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 9, pp. 713–718. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-713-718>
46. Hardy H.K. A “subregular” solution model and its application to some binary alloy systems. *Acta Metallurgica*. 1953, vol. 1, no. 1, pp. 202–210.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Леонид Абрамович Большов, д.ф.-м.н., профессор кафедры математики и информатики, Вологодский государственный университет
E-mail: labolshov@mail.ru

Светлана Константиновна Корнейчук, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики, Вологодский государственный университет
E-mail: korn62@mail.ru

Элина Леонидовна Большова, доцент кафедры английского языка, Вологодский государственный университет
E-mail: labolshov@mail.ru

Leonid A. Bol'shov, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof. of the Chair of Mathematics and Informatics, Vologda State University
E-mail: labolshov@mail.ru

Svetlana K. Korneichuk, Cand. Sci. (Phys.–Math.), Assist. Prof. of the Chair of Physics, Vologda State University
E-mail: korn62@mail.ru

Elina L. Bol'shova, Assist. Prof. of the Chair of English, Vologda State University
E-mail: labolshov@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Л. А. Большов – идея и текст статьи.
С. К. Корнейчук – анализ метода и результатов, оформление текста и сопровождающих документов.
Э. Л. Большова – перевод на русский язык англоязычных статей, перевод на английский язык аннотации и библиографического списка.

L. A. Bol'shov – formation of the article idea, writing the text.
S. K. Korneichuk – analysis of the method and results, revising the text and accompanying documents.
E. L. Bol'shova – translation of English articles, translation into English of annotation and references.

Поступила в редакцию 28.01.2022
После доработки 19.04.2022
Принята к публикации 25.04.2022

Received 28.01.2022
Revised 19.04.2022
Accepted 25.04.2022

Над номером работали:

Леонтьев Л.И., *главный редактор*

Ивани Е.А., *заместитель главного редактора*

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

Долицкая О.А., *научный редактор*

Расенец В.В., *верстка, иллюстрации*

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

Подписано в печать 25.07.2022. Формат 60×90 ¹/₈. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 9,5. Заказ 15381. Цена свободная.

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

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

BAUSCHINGER EFFECT DURING ALTERNATING DEFORMATION

STRUCTURE AND PROPERTIES OF HIGH-ENTROPY FeCoCrNiAl ALLOY COATING

THERMAL UPGRADING OF NICKEL FROM LIMONITE BY MEANS OF SELECTIVE REDUCTION

DEVELOPMENT OF A CENTRALIZED SYSTEM FOR SEPARATING LUBRICATION SUPPLY ON PRESS-FORMS OF JSC "RIFAR" CASTING COMPLEXES

OPTIMIZING THE MODE OF CONTACT BUTT WELDING OF RAILWAY RAILS

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON NITRIDING RATE IN OBTAINING METAL POWDERS BY PLASMA CENTRIFUGAL SPRAYING

ASSESSMENT OF EFFICIENCY OF THE USE OF BAKAL SIDERITES IN BLAST FURNACE SMELTING

METAL LEACHING FROM ORE DRESSING TAILINGS

WAGNER COEFFICIENT OF INTERACTION BETWEEN HYDROGEN AND NICKEL IN LIQUID STEEL