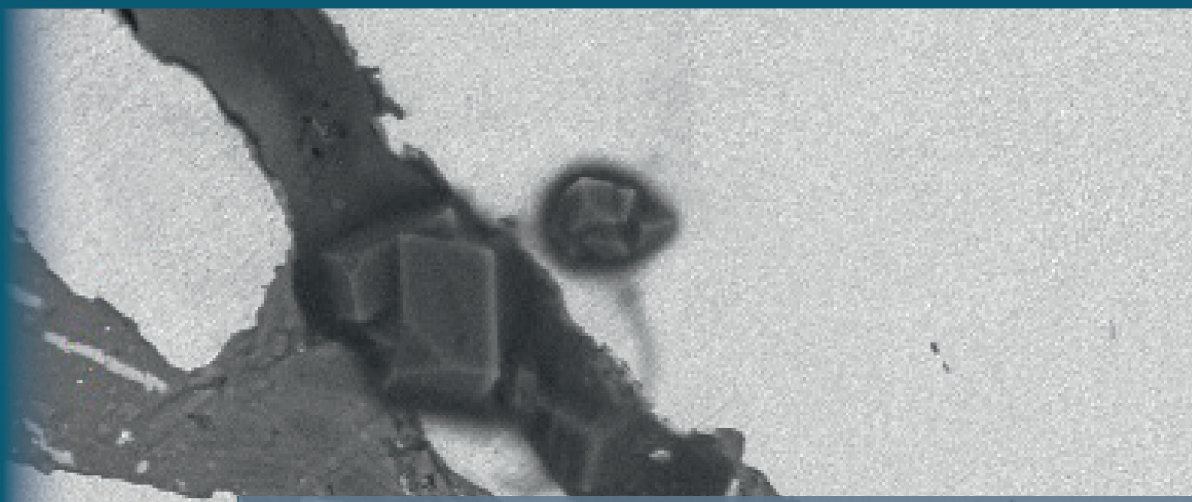
ISSN 0368-0797 *(Print)*
ISSN 2410-2091 *(Online)*

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 64 Номер 5 2021



• МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Брикетирование пористых глиноземсодержащих материалов на органических связующих

Оптимизация технологии производства непрерывнолитой заготовки рельсовой стали с целью повышения чистоты по неметаллическим включениям

• ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Термодинамическое моделирование восстановления железа и никеля из расплава B_2O_3–CaO–Fe_2O_3–NiO смесями CO–CO_2 и H_2–H_2O

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

Разработка конструкции и технологии изготовления импеллера флотационной машины на основе аддитивных технологий

IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY Vol. 64 No. 5 2021

Web: fermet.misis.ru

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

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 64, Номер 5, 2021

Научно-технический журнал
Издается с января 1958 г. ежемесячно

IZVESTIYA
FERROUS METALLURGY

Volume 64, Number 5, 2021

Scienitifc and Technical Journal
Published since January 1958. Issued monthly

Москва / Moscow, 2021

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

www.fermet.misis.ru

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

Варианты названия:

Известия вузов. Черная металлургия
Izvestiya. Ferrous Metallurgy

Учредители:

МИСиС
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ МИСиС)

Сибирский государственный индустриальный университет

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

Заместитель главного редактора:
Евгений Валентинович Протопопов, д.т.н., профессор, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

Адреса редакций:

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

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

Редакционная коллегия:

Алешин Н.П., д.т.н., профессор, академик РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
Астахов М.В., д.т.н., профессор, НИТУ «МИСиС», г. Москва
Ашихмин Г.В., д.т.н., профессор, ОАО «Ин-т Цветметобработка», г. Москва
Байсанов С.О., д.т.н., профессор, ХМИ им. Ж.Абишева, г. Караганда, Республика Казахстан
Белов В.Д., д.т.н., профессор, НИТУ «МИСиС», г. Москва
Бродов А.А., к.экон.н., ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва
Волынкина Е.П., д.т.н., профессор, СибГИУ, г. Новокузнецк
Глезер А.М., д.ф.-м.н., профессор, НИТУ «МИСиС», г. Москва
Горбатюк С.М., д.т.н., профессор, НИТУ «МИСиС», г. Москва
Григорович К.В., академик РАН, д.т.н., ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва
Громов В.Е., д.ф.-м.н., профессор, СибГИУ, г. Новокузнецк
Дмитриев А.Н., д.т.н., академик, профессор, ИМЕТ УрО РАН, г. Екатеринбург
Дуб А.В., д.т.н., профессор, ЗАО «Наука и инновации», г. Москва
Жучков В.И., д.т.н., профессор, ИМЕТ УрО РАН, г. Екатеринбург
Зингер Р.Ф., д.т.н., профессор, Институт Фридриха-Александра, Германия
Зиниград М., д.т.н., профессор, Институт Ариэля, Израиль
Золотухин В.И., д.т.н., профессор, ТулГУ, г. Тула
Колмаков А.Г., д.т.н., чл.-корр. РАН, ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва
Колокольцев В.М., д.т.н., профессор, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск
Костина М.В., д.т.н., ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва
Косырев К.Л., д.т.н., профессор, АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва
Курганова Ю.А., д.т.н., профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
Курносов В.В., к.ф.-м.н., доцент, НИТУ «МИСиС», г. Москва
Линн Х., ООО «Линн Хай Терм», Германия
Лысак В.И., д.т.н., профессор, ВолгГТУ, г. Волгоград
Мешалкин В.П., д.т.н., профессор, академик РАН, РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва
Мулюков Р.Р., д.ф.м.-н., профессор, чл.-корр. ФГБУН ИПСМ РАН, г. Уфа
Мышляев Л.П., д.т.н., профессор, СибГИУ, г. Новокузнецк
Никулин С.А., д.т.н., профессор, чл.-корр. РАЕН, НИТУ «МИСиС», г. Москва
Нурумгалиев А.Х., д.т.н., профессор, КГИУ, г. Караганда, Республика Казахстан
Островский О.И., д.т.н., профессор, Университет Нового Южного Уэльса, Сидней, Австралия
Пиетрелли Лорис, д.т.н., Итальянское национальное агентство по новым технологиям, энергетике и устойчивому экономическому развитию, Рим, Италия
Подгородецкий Г.С., к.т.н., доцент, НИТУ «МИСиС», г. Москва
Пышминцев И.Ю., д.т.н., РосНИТИ, г. Челябинск
Рудской А.И., д.т.н., профессор, СПбПУ Петра Великого, г. Санкт-Петербург
Сивак Б.А., к.т.н., профессор, АО АХК «ВНИИМЕТМАШ», г. Москва
Симонян Л.М., д.т.н., профессор, НИТУ «МИСиС», г. Москва
Смирнов Л.А., д.т.н., профессор, академик, РАН ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург
Солодов С.В., к.т.н., НИТУ «МИСиС», г. Москва
Спирин Н.А., д.т.н., профессор, УрФУ, г. Екатеринбург
Танг Гуои, Институт перспективных материалов университета Циньхуа, г. Шеньжень, Китай
Темлянцев 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:

MISIS
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@misis.ru

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

Editorial Board:

Nikolai P. Aleshin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician of RAS, Bauman STU, Moscow
German V. Ashikhmin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., JSC "Institute Tsvetmetobrabotka", Moscow
Mikhail V. Astakhov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST "MISIS", Moscow
Sailaubai O. Baisanov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Republic of Kazakhstan
Vladimir D. Belov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST "MISIS", Moscow
Anatolii A. Brodov, Cand. Sci. (Econ.), Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy, Moscow
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, Dr.Sci.(Eng.), Prof., Rector, Volgograd State Technical University, Volgograd
Valerii P. Meshalkin, Dr. Sci. (Eng.), Academician of RAS, Prof., D.I. Mendeleyev Russian Chemical-Technological University, Moscow
Radik R. Mulyukov, Dr. Sci. (Phys.-Chem.), Prof., Corresponding Member of RAS, Institute of Metals Superplasticity Problems of RAS, Ufa
Leonid P. Myshlyaev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk
Sergei A. Nikulin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member of RANS, NUST "MISIS", Moscow
Asylbek Kh. Nurumgaliev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Karaganda State Industrial University, Karaganda, Republic of Kazakhstan
Oleg I. Ostrovski, Dr. Sci. (Eng.), Prof., University of New South Wales, Sidney, Australia
Loris Pietrelli, Dr., Scientist, Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development, Rome, Italy
Gennadii S. Podgorodetskii, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., NUST "MISIS", Moscow
Igor' Yu. Pyshmintsev, Dr. Sci. (Eng.), Russian Research Institute of the Pipe Industry, Chelyabinsk
Andrei I. Rudskoi, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg
Oleg Yu. Sheshukov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Ural Federal University, Yekaterinburg
Laura M. Simonyan, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST "MISIS", Moscow
Robert F. Singer, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Friedrich-Alexander University, Germany
Boris A. Sivak, Cand. Sci.(Eng.), Prof., VNIIMETMASH Holding Company, Moscow
Leonid A. Smirnov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician of RAS, OJSC "Ural Institute of Metals", Yekaterinburg
Sergei V. Solodov, Cand. Sci. (Eng.), NUST "MISIS", Moscow
Speidel Marcus, Dr. Natur. Sci., Prof., Swiss Academy of Materials, Switzerland
Nikolai A. Spirin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Ural Federal University, Yekaterinburg
Tang Guoi, Institute of Advanced Materials of Tsinghua University, Shenzhen, China
Mikhail V. Temlyantsev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk
Ekaterina P. Volynkina, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk
Aleksei B. Yur'ev, Dr. Sci. (Eng.), Assist Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk
Vladimir S. Yusupov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow
Vladimir I. Zhuchkov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute of Metallurgy, Ural Branch of RAS, Ural Federal University, Yekaterinburg
Michael Zinigrad, Dr. Sci. (Physical Chemistry), Prof., Rector, Ariel University, Israel
Vladimir I. Zolotukhin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Tula State University, Tula

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

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

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

Articles are available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Известия вузов. Черная металлургия.
2021. Том 64. № 5

Izvestiya. Ferrous Metallurgy.
2021. Vol. 64. No. 5

СОДЕРЖАНИЕ / CONTENTS

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Аксенова В.В., Алимбаев С.А., Павлов А.В., Мустафин Р.М. Брикетирование пористых глиноземсодержащих материалов на органических связующих 323

Зайдес С.А., Фам Ван Ань, Климова Л.Г. Повышение качества калиброванной стали поверхностным деформированием. Часть 2. Влияние охватывающего поверхностного деформирования на остаточные напряжения в цилиндрических прутках 330

Снитко С.А., Яковченко А.В., Горбатюк С.М. Метод учета остаточных технологических напряжений при моделировании напряженно-деформированного состояния диска железнодорожного колеса. Сообщение 1 337

Григорьев А.М., Кузнецов М.С., Шепелев Д.С., Алексеев Е.М., Григорович К.В. Оптимизация технологии производства непрерывнолитой заготовки рельсовой стали с целью повышения чистоты по неметаллическим включениям 345

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

Aksenova V.V., Alimbaev S.A., Pavlov A.V., Mustafin R.M. Briquetting of porous alumina-containing materials with organic binders .. 323

Zaides S.A., Pham Van Anh, Klimova L.G. Quality improvement of calibrated steel by surface deformation. Part 2. Effect of enveloping surface deformation on residual stresses in cylindrical bars 330

Snitko S.A., Yakovchenko A.V., Gorbatyuk S.M. Accounting method for residual technological stresses in modeling the stress-deformed state of a railway wheel disk. Report 1 337

Grigor'ev A.M., Kuznetsov M.S., Shepelev D.S., Alekseev E.M., Grigorovich K.V. Optimization of production technology of continuous cast rail steel for increasing its purity by non-metallic inclusions 345

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Селиванов Е.Н. Термодинамическое моделирование восстановления железа и никеля из расплава B_2O_3–CaO–Fe_2O_3–NiO смесями CO–CO_2 и H_2–H_2O 353

Бердников В.И., Гудим Ю.А. К термодинамике восстановления железа из оксидов 360

Большов Л.А., Корнейчук С.К., Большова Э.Л. Вагнеровский параметр взаимодействия азота с кобальтом в жидких сплавах на основе никеля 363

PHYSICO-CHEMICAL BASICS OF METALLURGICAL PROCESSES

Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Selivanov E.N. Thermodynamic modeling of nickel and iron reduction from B_2O_3–CaO–Fe_2O_3–NiO melt by CO–CO_2 and H_2–H_2O mixtures 353

Berdnikov V.I., Gudim Yu.A. On thermodynamics of iron reduction from oxides 360

Bol'shov L.A., Korneichuk S.K., Bol'shova E.L. Wagner interaction coefficient between nitrogen and cobalt in liquid nickel-based alloys 363

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

Седых Л.В., Борисов П.В., Пашков А.Н., Горбатюк Н.В., Суркова Р.Ю., Маматкулов Ж.Х. Разработка конструкции и технологии изготовления импеллера флотационной машины на основе аддитивных технологий 366

INNOVATIONS IN METALLURGICAL INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES AND MATERIALS

Sedykh L.V., Borisov P.V., Pashkov A.N., Gorbatyuk N.V., Surkova R.E., Mamatkulov J. Development of flotation machine impeller on the base of additive technologies 366

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АВТОМАТИЗАЦИЯ В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Богатова М.Ж., Чибизова С.И. Статистическое моделирование температурных режимов работы нагревательных печей листовых станов горячей прокатки 374

Лицин К.В., Цуканов А.В. Разработка автоматизированного электропривода системы управления двухкоординатным станком сварки 382

INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATIC CONTROL IN FERROUS METALLURGY

Bogatova M.Zh., Chibizova S.I. Statistical modeling of temperature operating modes of heating furnaces for hot strip mills 374

Litsin K.V., Tsukanov A.V. Automated electric drive for the control system of two-coordinate welding machine 382

Оригинальная статья
УДК 669.1:622.788.32
DOI 10.17073/0368-0797-2021-5-323-329

Брикетирование пористых глиноземсодержащих материалов на органических связующих

В. В. Аксенова, С. А. Алимбаев, А. В. Павлов, Р. М. Мустафин

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

Аннотация. Отходы корундового производства в виде пористых глиноземистых шламов являются перспективным материалом для обеспечения черной металлургии дешевыми глиноземсодержащими шлакообразующими материалами. Однако непосредственная подача пылеватых материалов в сталеплавильную печь, как правило, приводит к значительному выносу таких материалов с отходящими газами. В данной работе рассмотрена возможность изготовления брикетов из пористых шламов корундового производства способом холодного брикетирования на различных распространенных связующих материалах (меласса, цемент, порошок на основе полиакриламида, эмульсия на основе поливинилацетата). Произведено сравнение особенностей холодного брикетирования порошкообразных пористых материалов (шламы производства электрокорунда) и дисперсных кристаллических материалов (мелочь хромовой руды). Проведены эксперименты по определению ударной прочности брикетов на различном связующем (холодная прочность) и испытания по определению горячей прочности (методом испытания на термошок). Определен расход связующего, требующегося для получения удовлетворительных характеристик брикетов из шламов корундового производства и из мелочи хромовой руды. Разработана методика и определен механизм связывания частиц рыхлых и кристаллических материалов при брикетировании с применением порошка полиакриламида. Показано, что разрушение брикета из рыхлых материалов происходит главным образом по зернам самого пористого материала, а брикеты из кристаллических материалов разрушаются по границам склеенных связующим зерен. Для пористых материалов расход связующего увеличивается более, чем в два раза по сравнению с брикетированием на тех же связующих кристаллических тел мелкой фракции, причем связующее обязательно должно пропитывать весь объем пористого материала.

Ключевые слова: холодное брикетирование, органические и неорганические связующие, полиакриламид, глиноземсодержащие шламы, холодная прочность, горячая прочность, механизм разрушения брикета

Для цитирования: Аксенова В.В., Алимбаев С.А., Павлов А.В., Мустафин Р.М. Брикетирование пористых глиноземсодержащих материалов на органических связующих // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 323–329. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-323-329

Original article

Briquetting of porous alumina-containing materials with organic binders

V. V. Aksenova, S. A. Alimbaev, A. V. Pavlov, R. M. Mustafin

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

Abstract. Waste from corundum production in the form of porous alumina sludge is a promising material for providing ferrous metallurgy with cheap alumina-containing slag-formers. However, the direct feeding of the pulverized materials to the steelmaking furnace generally results in a significant carryover of such materials with waste gases. This paper considers the possibility of making briquettes from porous sludge of corundum production by cold briquetting using various common binders (molasses, cement, powder based on polyacrylamide, emulsion based on polyvinyl acetate). A comparison of the features of cold briquetting of powdered porous materials (slimes from the production of electrocorundum) and dispersed crystalline materials (fines of chrome ore) was made. Experiments were carried out to determine the impact strength of briquettes on different binder (“cold” strength) and tests to determine the “hot” strength (by the “thermal shock” test method). The authors have determined the consumption of the binder required to obtain satisfactory characteristics of briquettes from corundum slimes and from chrome ore fines. A technique has been developed and a mechanism for the binding of particles of loose and crystalline materials has been determined during briquetting using polyacrylamide powder. The destruction of a briquette of loose materials occurs mainly along the grains of the most porous material, and briquettes of crystalline materials are destroyed along the boundaries of the grains glued with a binder. For porous materials, the binder consumption increases more than twice as compared to briquetting on the same binder crystalline bodies of a fine fraction, and the binder must necessarily impregnate the entire volume of the porous material.

Keywords: cold briquetting, organic binders, nonorganic binders, polyacrylamide, alumina-containing sludge, cold crushing strength, hot strength, briquette destruction mechanism

For citation: Aksenova V.V., Alimbaev S.A., Pavlov A.V., Mustafin R.M. Briquetting of porous alumina-containing materials with organic binders. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 5, pp. 323–329. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-323-329

Введение

Холодное брикетирование является одним из распространенных способов окускования мелкодисперсных материалов для дальнейшего металлургического передела. Изготавливают брикеты из мелкой руды, угольной и коксовой пыли, флюсов, отходов металлургического производства и т. п. [1 – 5]. Подача материалов в компактном виде в металлургический агрегат предотвращает его вынос с отходящими газами, а в случае восстановительной плавки обеспечивает газопроницаемость столба шихтовых материалов. Кроме того, брикетирование сокращает потери материала при транспортировке.

Холоднобрикетированные материалы должны обладать достаточными величинами холодной и горячей прочности [6 – 10], обеспечивающими целостность брикета на всех этапах металлургического передела. Это решается правильным подбором связующего вещества, а также способом брикетирования.

Для каждой группы материалов существуют свои технологические особенности изготовления брикетов, а также определенные связующие материалы. В свою очередь, при использовании того или иного вида связующего материала нужно учитывать особенности брикетирования в зависимости от модификации твердых тел.

Характеристика используемых материалов

В данной работе рассмотрена возможность изготовления брикетов из пористых шламов корундового производства. Данные шламы могут послужить сырьем для производства известково-глиноземистых шлаков и кальция углеродистого, которые широко используются для внепечной обработки стали и раскисления. Замена высококачественного глинозема на отходы корундового производства в черной металлургии является экономически целесообразным. Однако особенностью глиноземистых шламов является невысокая прочность самих частиц шлама, что затрудняет получение необходимой прочности готового брикета.

В качестве материала для сравнения была использована мелочь хромовой руды, имеющая кристаллическое строение. Мелкая хромовая руда брикетируется и применяется при выплавке ферросплавов хрома [11 – 13]. Изученные шламы корундового производства и хромовая руда имели фракцию меньше 1 мм. Химические составы материалов представлены в табл. 1.

К связующим материалам предъявляется ряд требований. Во первых, связующее при брикетировании должно обеспечивать необходимые прочностные свойства брикета как в холодном состоянии, так и при температуре металлургического процесса. Одновременно связующий материал не должен вносить вредных и балластных примесей в материал.

Если до недавнего времени в черной металлургии широко использовались неорганические связующие типа цемента или бентонита, то в настоящее время набирают популярность полимерные органические связующие, которые могут частично или полностью заменить неорганические [14 – 17]. Как правило, полимерные связующие разлагаются при высоких температурах без выделения опасных продуктов распада и полностью улетучиваются.

В качестве рассматриваемых связующих были выбраны четыре материала: неорганическое – цемент марки М500, органическое растительного происхождения – раствор сахара в воде (аналог меласса), два органических синтетического происхождения – порошок на основе полиакриламида (ПАА) и эмульсия на основе поливинилацетата (ПВВ) (табл. 2).

Описание метода исследования

Определение прочностных свойств брикетов проводили в два этапа: холодное испытание брикетов на ударную прочность и горячее испытание на термошок.

Брикетирование материалов. Брикетирование производилось методом ударно-вибрационного прессования в пресс-форме с внутренним диаметром 25 мм. В случае, когда связующее было в виде порошка, проводили предварительное смешивание его с сухой шихтой для равномерного распределения компонентов. В случае, если связующее было в виде эмульсии, его добавляли в заранее увлажненную шихту. Расход связующего материала выбирался в соответствии с инструкцией по применению, а также на основе литературных и экспериментальных данных [18 – 21]. Расход мелассы на брикетирование составил 1 – 6 % массы материала (или 0,4 – 2,4 % в пересчете на сухое вещество), цемента – 4 – 12 %, порошка полиакриламида –

Таблица 1

Химический состав исходных материалов, %

Table 1. **Chemical composition of the raw materials, %**

Шламы корундового производства						Мелочь хромовой руды							
Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	S	Cr_2O_3	FeO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	CaO	S	P
68,4	11,1	15,9	0,05	4,3	0,13	52,3	12,9	7,7	19,5	7,1	0,5	0,02	0,002

Таблица 2

Характеристика связующих материалов

Table 2. **Characteristics of the binders**

Показатель	Вид связующего материала			
	цемент	меласса	ПАА	ПВА
Форма	порошок	эмульсия	порошок	эмульсия
Массовая доля сухого вещества, %	100	40	100	50
Тип	неорганическое	органическое	органическое	органическое

0,2 – 0,6 %, эмульсии поливинилацетата – 1,2 – 2,8 % (или 0,6 – 1,4 % в пересчете на сухое вещество).

Готовые влажные брикеты подвергали сушке на воздухе в течение 120 мин при температуре 100 °С. Влажность материалов при брикетировании должна находиться в определенных пределах. Опытным путем определено, что для глиноземистых шламов этот показатель находится в пределах 16 – 19 %, а для рудной хромовой мелочи он в два раза меньше – 8 – 9 %.

Испытания на холодную прочность. Испытания проводили путем сбрасывания брикета с высоты 1,8 м на стальную плиту. Далее измеряли массу самого большого не разрушившегося куска. Сбрасывания повторяли до тех пор, пока потеря массы не превышала 40 % исходной.

В ходе испытаний на холодную прочность определено, что только полимерные связующие обеспечивают минимально необходимую ударную прочность для брикетов из алюминийсодержащих шламов – от 2 до 4 сбрасываний на стальную плиту. При брикетировании на мелассе и цементе брикеты из шлама при первом ударе о стальную плиту рассыпались в пыль. Брикеты из мелочи хромовой руды, брикетированные на полиакриламиде, выдерживают до 22 сбрасываний. Для брикетов из мелочи хромовой руды некоторую ударную прочность обеспечивают также цемент (1 сбрасывание) и меласса (1 – 3 сбрасываний), но в больших количествах (более 12 и 6 % соответственно).

Испытания на горячую прочность. Брикеты на всех четырех видах связующих были испытаны на горячую прочность (в том числе и брикеты на воде). Суть испытания на термошок – сброс брикета, находящегося при комнатной температуре, в разогретое до 1600 °С пространство печи. Испытание проводили в лабораторной электропечи сопротивления с графитовым нагревателем. Брикет помещали в шлюз-дозатор и разогревали печь до заданной температуры. По достижению указанной температуры брикет сбрасывали в алундовый тигель. Время выдержки брикета в печи составляло 10 мин. Данные об изменении температуры в пространстве печи фиксировались с помощью тепловизора модели Pyrovision M9000. По истечению заданного времени брикет извлекали из печи и оценивали степень разрушения и наличие внешних дефектов после спекания. По итогу проведенных экспериментов следует подчеркнуть, что испытания на термошок выдержали брикеты как из шлама, так и из мелкой хромовой руды на всех видах связующих, в том числе на воде.

При проведении некоторых серий испытаний на термошок наблюдали задымленность в пространстве печи. В эти моменты была затруднена работа тепловизора и на графиках (рис. 1), которые автоматически пишутся с тепловизора, можно увидеть горизонтальную площадку. И чем больше связующего в брикете, которое вызывает дымление, тем она длиннее. По величине данной площадки можно качественно определить, насколько применим тот или иной вид связующего в металлургических процессах.

В проведенных «горячих» экспериментах хорошо себя показали цемент и порошок полиакриламида,

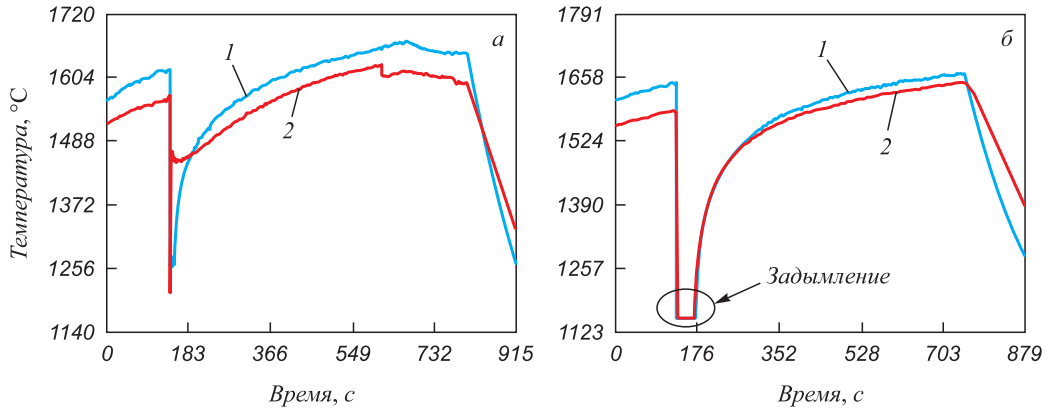


Рис. 1. Температурные графики с тепловизора:
1 – температура тигля; *2* – температура поверхности брикета

Temperature graphs from a thermal imager:
1 – crucible temperature; *2* – briquette surface temperature

а при брикетировании на мелассе и эмульсии на основе поливинилацетата наблюдалось сильное задымление.

Для двух разновидностей брикетов определено содержание кристаллогидратной влаги. Потери массы после проведения горячих испытаний для глиноземистых шламов варьировались в пределах 9,5 – 12 %, а для брикетов из мелочи хромовой руды – 4,4 – 7,2 % независимо от типа связующего. Объем брикета после спекания в случае со шламами уменьшился в среднем на 15 %, а для мелочи хромовой руды – на 2 %.

Помимо того, что связующее не должно вносить вредных и балластных примесей, оно может выступать либо в качестве флюса, либо в качестве восстановителя. Поскольку в органических связующих находится углерод в связанном виде, то он может выступать в качестве восстановителя. Степень металлизации брикетов с органическим связующим определяли с помощью оптического микроскопа. На рис. 2 показана явная зависимость количества металлических включений от увеличения массы порошка полиакриламида в брикете.

После проведенных экспериментов было определено, что наиболее предпочтительным для брикетирования алюминийсодержащих шламов является порошок на основе полиакриламида, так как он обеспечивает как необходимую холодную, так и горячую прочность при весьма низком расходе вплоть до 0,4 % массы брикета. Кроме того, он не вносит вредных и балластных примесей, важность чего отмечалась ранее. Также данный набор характеристик обеспечивает эмульсия на основе поливинилацетата, но при использовании ее вдвое большем количестве по сравнению с полиакриламидном (в пересчете на сухое существо).

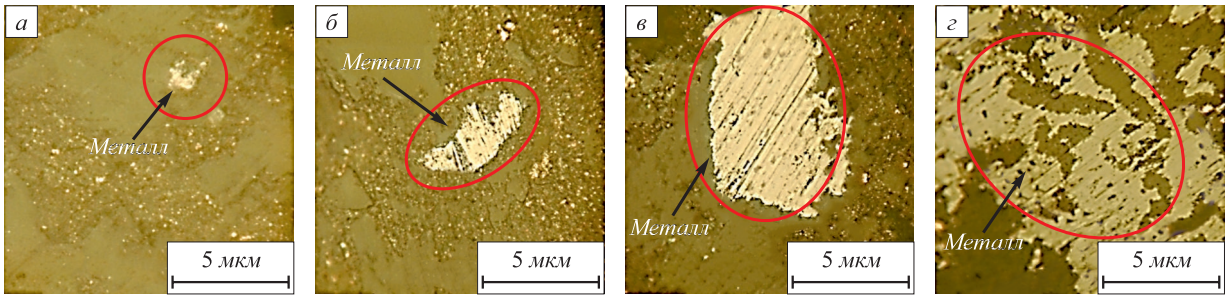


Рис. 2. Металлические включения в обожженных брикетах, содержание ПАА, %:
а – 0,2; *б* – 0,4; *в* – 0,6; *г* – 1,4

Fig. 2. Metallic inclusions in the burned briquettes, polyacrylamide content, %:
а – 0.2; *б* – 0.4; *в* – 0.6; *г* – 1.4

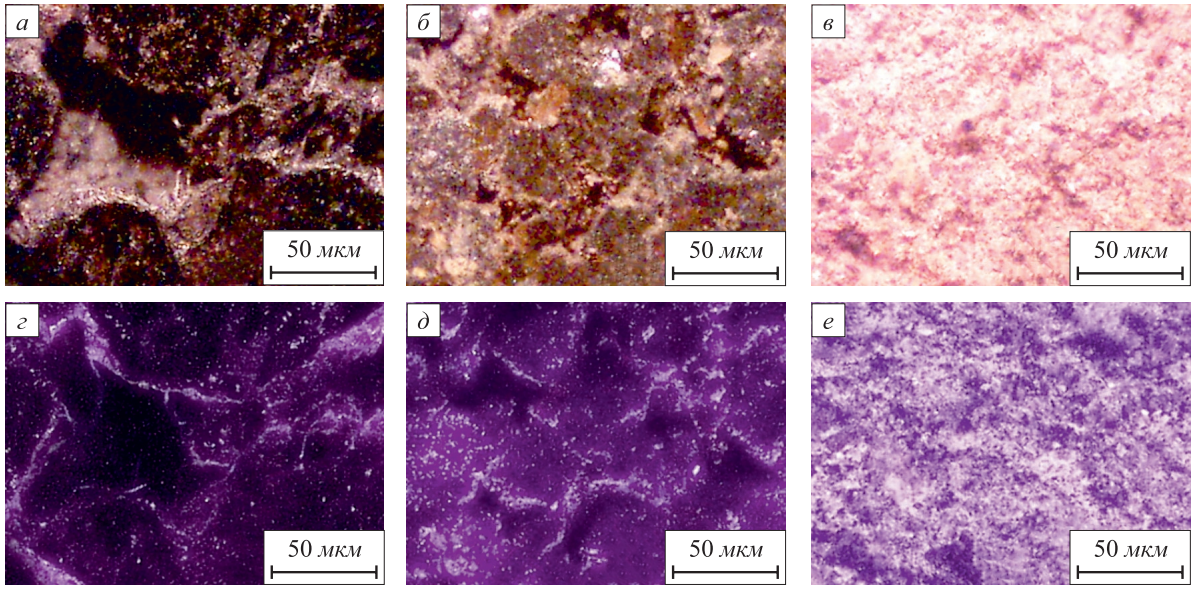


Рис. 3. Микрофотография поверхности брикета при естественном свете: *а* – электрокорунд; *б* – хромовая руда; *в* – шлам (Al_2O_3) и при УФ-свете: *г* – электрокорунд; *д* – хромовая руда; *е* – шлам (Al_2O_3)

Fig. 3. Micrograph of the briquette surface in natural light: *а* – electrocorundum; *б* – chrome ore; *в* – sludge (Al_2O_3); and in UV light: *г* – electrocorundum; *д* – chrome ore; *е* – sludge (Al_2O_3)

Определение механизма связывания частиц

Для порошка на основе полиакриламида, как для связующего, показавшего наилучшие результаты при брикетировании шламов, был изучен механизм связывания твердых частиц при брикетировании.

Механизм связывания изучали с помощью окрашивания порошка полиакриламида флуоресцентной водорастворимой краской. Подобный краситель применяется для обнаружения протечек в водных системах при активации свечения в ультрафиолетовом свете.

Порошок полиакриламида растворяли в воде, в которой он превращался в прозрачную гелеобразную эмульсию. Эмульсию окрашивали водным раствором флуоресцентного красителя. На рис. 3 представлена микрофотография отшлифованных поверхностей брикетов, изготовленных на окрашенном связующем, при естественном и ультрафиолетовом освещении.

Производили также брикетирование на окрашенном полиакриламидном связующем и крупных кристаллов нормального электрокорунда. В случае с кристаллами электрокорунда и хромовой руды связующее располагается пленкой на поверхности зерен, тем самым создавая тонкую клеящую поверхность.

В случае глиноземсодержащего шлама его частицы впитывают вовнутрь эмульсию полиакриламида, что проявляется в сплошном свечении всего объема материала в ультрафиолетовых лучах, а не только границы склеенных зерен.

Соответственно при брикетировании пористых материалов расход связующего, необходимый для получения требуемых прочностных характеристик, всегда будет значительно выше, чем для кристаллических частиц.

Выводы

При брикетировании различных материалов необходимо учитывать модификацию твердых тел. Для изготовления брикетов из шламов корундового производства, лишь органические связующие могут обеспечить требуемый набор характеристик для дальнейшего металлургического передела данного материала. Отличительной особенностью является то, что для пористых материалов расход связующего увеличивается более, чем в два раза по сравнению с брикетированием на тех же связующих кристаллических тел мелкой фракции (в данном случае хромовой руды).

Список литературы / References

1. Равич Б.М. Брикетирование в цветной и черной металлургии. М.: Металлургия, 1975. 232 с.
2. Назимко Е.И. Окускование материалов как метод использования различных отходов. В кн.: Актуальные проблемы биоразнообразия и природопользования: Материалы II Национальной научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры экологии моря ФГБОУ «КГМТУ». 15–17 мая 2019, Керчь. Симферополь: Ариал, 2019. С. 367–373.
3. Diez M.A., Alvarez R., Cimadevilla J.L.G. Briquetting of carbon-containing wastes from steelmaking for metallurgical coke production // Fuel. 2013. Vol. 114. P. 216–223. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.018
4. Brozova S., Pustejovska P., Bilik J., Jursova S., Zbrankova M., Havranek J. Innovated technologies of recycling of metallic wastes–modification of existing industrial processes // New Trends in Production Engineering. 2019. Vol. 2. No. 2. P. 361–367. https://doi.org/10.2478/ntpe-2019-0100
5. Murthy Y.R., Kapure G.U., Tripathy S.K., Sahu G.P. Recycling of ferromanganese gas cleaning plant (GCP) sludge by novel agglomeration // Waste Management. 2018. Vol. 80. P. 457–465. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.023
6. Ожогин В.В., Томаш А.А., Ковалевский И.А. и др. Брикетирование как полноправный метод окускования металлургического сырья // Металлургические процессы и оборудование. 2005. №. 2. С. 54–58.
7. Shaik A.A., Pal S., Jha R. Briquetting: A new approach to recycle the waste iron-bearing materials generated in steel plants // Journal of Metallurgy and Materials Science. 2005. Vol. 47. No. 4. P. 199–206.
8. Taulbee D., Patil D.P., Honaker R.Q., Parekh B.K. Briquetting of coal fines and sawdust Part I: Binder and briquetting-parameters evaluations // International Journal of Coal Preparation and Utilization. 2009. Vol. 29. No. 1. P. 1–22. https://doi.org/10.1080/19392690802628705
9. Zhang G., Sun Y., Xu Y. Review of briquette binders and briquetting mechanism // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 82. P. 477–487. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.072

1. Ravich B.M. *Briquetting in Non-Ferrous and Ferrous Metallurgy*. Moscow: Metallurgiya, 1975, 232 p. (In Russ.)
2. Nazimko E.I. Materials sintering as a method of using various waste. In: *Actual Problems of Biodiversity and Nature Management. Materials of the II Nation. Sci. and Pract. Conf. dedicated to the 20th Anniversary of the Department of Marine Ecology FSBEI "KSMTU" May 15–17, 2019, Kerch*. Simferopol: Arial, 2019, pp. 367–373. (In Russ.)
3. Diez M.A., Alvarez R., Cimadevilla J.L.G. Briquetting of carbon-containing wastes from steelmaking for metallurgical coke production. *Fuel*. 2013, vol. 114, pp. 216–223. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.018
4. Brozova S., Pustejovska P., Bilik J., Jursova S., Zbrankova M., Havranek J. Innovated technologies of recycling of metallic wastes–modification of existing industrial processes. *New Trends in Production Engineering*. 2019, vol. 2, no. 2, pp. 361–367. https://doi.org/10.2478/ntpe-2019-0100
5. Murthy Y.R., Kapure G.U., Tripathy S.K., Sahu G.P. Recycling of ferromanganese gas cleaning plant (GCP) sludge by novel agglomeration. *Waste Management*. 2018, vol. 80, pp. 457–465. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.023
6. Ozhogin V.V., Tomash A.A., Kovalevskii I.A., etc. Briquetting as a full-fledged method of agglomeration of metallurgical raw materials. *Metallurgicheskie protsessy i oborudovanie*. 2005, no. 2, pp. 54–58. (In Russ.)
7. Shaik A.A., Pal S., Jha R. Briquetting: A new approach to recycle the waste iron-bearing materials generated in steel plants. *Journal of Metallurgy and Materials Science*. 2005, vol. 47, no. 4, pp. 199–206.
8. Taulbee D., Patil D.P., Honaker R.Q., Parekh B.K. Briquetting of coal fines and sawdust Part I: Binder and briquetting-parameters evaluations. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2009, vol. 29, no. 1, pp. 1–22. https://doi.org/10.1080/19392690802628705
9. Zhang G., Sun Y., Xu Y. Review of briquette binders and briquetting mechanism. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, vol. 82, pp. 477–487. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.072

10. Kuskov V., Kuskova Y., Udovitsky V. Effective processing of the iron ores // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences. 2017. Vol. 21. Article 02010. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172102010
11. Алимбаев С.А., Алмагамбетов М.С., Нургали Н.З., Павлов А.В. Применение экструзионных брикетов для выплавки углеродистого феррохрома // Черные металлы. 2020. №. 5. С. 4–8.
12. Kurunov I., Bizhanov A. Stiff Extrusion Briquetting in Metallurgy. Springer International Publishing, 2018.
13. Steele R.B., Bizhanov A. Stiff extrusion agglomeration of arc furnace dust and ore fines for recovery at a ferroalloy smelter // Proc. 32nd Biennial Conf. 2011. P. 41–53.
14. Юленков Н.С., Муравский А.А., Литосов Г.Э. и др. Свойства композиций полиакриламида и пентанпентаола. В кн.: Наука сегодня: задачи и пути их решения: Материалы Международной научно-практической конференции. 29 мая 2019 г., Вологда. Вологда: Маркер, 2019. С. 52–53.
15. Хадыев Я.А., Антонова М.В. Влияние состава связующего на свойства композиционного материала. В кн.: Молодежь и XXI век – 2020: Материалы X Международной молодежной научной конференции. 19–20 февраля 2020 г., Курск. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. С. 411–413.
16. Zhang G., Sun Y., Xu Y. Review of briquette binders and briquetting mechanism // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 82. P. 477–487. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.072
17. Sunde M. Organic binder as a substitute for bentonite in ilmenite pelletization: Cand Tech. Sci. Diss. Norway, 2012. 104 p.
18. Шабанов Е.Ж. Избембетов Д.Д., Байсанов С.О. и др. Технология производства высокоуглеродистого феррохрома с использованием моношихтовых брикетов // Известия вузов. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 9. С. 702–707. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-702-707
19. Бижанов А.М., Стил Б.Р., Подгородецкий Г.С., Курунов И.Ф., Дашевский В.Я., Коровушкин В.В. Брикеты экструзии (брэксы) для производства ферросплавов // Металлург. 2012. Т. 67. № 12. С. 52–57.
20. Kosturkiewicz B. The use of cement as a binder in the process of industrial waste briquetting // Przemysl Chemiczny. 2019. Vol. 98. No. 9. P. 1420–1422. https://doi.org/10.15199/62.2019.9.13
21. Manyuchi M.M., Mbohwa C., Muzenda E. Value addition of coal fines and sawdust to briquettes using molasses as a binder // South African Journal of Chemical Engineering. 2018. Vol. 26. P. 70–73. https://doi.org/10.1016/j.sajce.2018.09.004

10. Kuskov V., Kuskova Y., Udovitsky V. Effective processing of the iron ores. *E3S Web of Conferences. – EDP Sciences*. 2017, vol. 21, article 02010. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172102010
11. Alimbaev S.A., Almagambetov M.S., Nurgali N.Z., Pavlov A.V. The use of extrusion briquettes for smelting carbon ferrochrome. *Chernye metally*. 2020, no. 5, pp. 4–8. (In Russ.)
12. Kurunov I., Bizhanov A. *Stiff Extrusion Briquetting in Metallurgy*. Springer International Publishing, 2018.
13. Steele R.B., Bizhanov A. Stiff extrusion agglomeration of arc furnace dust and ore fines for recovery at a ferroalloy smelter. *Proc. 32nd Biennial Conf*. 2011, pp. 41–53.
14. Yulenkov N.S., Muravskii A.A., Litosov G.E., etc. Properties of polyacrylamide and pentanpentaol compositions. In: *Science Today: Problems and Ways to Solve Them: Materials of the Int. Sci. and Pract. Conf., May 29, 2019, Vologda*. Vologda: Marker, 2019, pp. 52–53. (In Russ.)
15. Khadyev Ya.A., Antonova M.V. Influence of binder composition on properties of composite material. In: *Youth and the XXI century-2020: Materials of the X Int.Youth Sci. Conf., February 19-20, 2020, Kursk*. Kursk: Southwest State University, 2020, pp. 411–413. (In Russ.)
16. Zhang G., Sun Y., Xu Y. Review of briquette binders and briquetting mechanism. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, vol. 82, pp. 477–487. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.072
17. Sunde M. *Organic binder as a substitute for bentonite in ilmenite pelletization: Cand. Tech. Sci. Diss*. Norway, 2012, 104 p.
18. Shabanov E.Zh., Izbembetov D.D., Baisanov S.O., Shadiev M.F. Technology for the production of high-carbon ferrochromium using mono-briquettes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 9, pp. 702–707. (In Russ.) https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-702-707
19. Bizhanov A.M., Steele R.B., Podgorodetskyi G.S., Kurunov I.F., Dashevskyi V.Ya., Korovushkin V.V. Extruded briquettes (bricks) for ferroalloy production. *Metallurgist*. 2013, vol. 56, no. 11–12, pp. 925–932. https://doi.org/10.1007/s11015-013-9676-2
20. Kosturkiewicz B. The use of cement as a binder in the process of industrial waste briquetting. *Przemysl Chemiczny*. 2019, vol. 98, no. 9, pp. 1420–1422. https://doi.org/10.15199/62.2019.9.13
21. Manyuchi M. M., Mbohwa C., Muzenda E. Value addition of coal fines and sawdust to briquettes using molasses as a binder. *South African Journal of Chemical Engineering*. 2018, vol. 26, pp. 70–73. https://doi.org/10.1016/j.sajce.2018.09.004

Сведения об авторах | Information about the authors

Виктория Владимировна Аксенова, *аспирант кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов,* Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
E-mail: axenovaviki@gmail.com

Сабыржан Алимбаевич Алимбаев, *аспирант кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов,* Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
E-mail: alim407@mail.com

Александр Васильевич Павлов, *д.т.н., профессор кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов,* Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
E-mail: pav-gnts@misis.ru

Руслан Миниярович Мустафин, *к.т.н., доцент кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов,* Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
E-mail: rus17@mail.ru

Viktoriya V. Aksenova, *Postgraduate of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection,* National University of Science and Technology "MISIS"
E-mail: axenovaviki@gmail.com

Sabyrzhan A. Alimbaev, *Postgraduate of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection,* National University of Science and Technology "MISIS"
E-mail: alim407@mail.com

Aleksandr V. Pavlov, *Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection,* National University of Science and Technology "MISIS"
E-mail: pav-gnts@misis.ru

Ruslan M. Mustafin, *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"
E-mail: rus17@mail.ru

Вклад авторов:

В.В. Аксенова – формирование основной концепции, цели и задачи исследования, написание текста рукописи, получение и анализ данных.
С.А. Алимбаев – обзор публикаций по теме статьи, получение данных для анализа.
А.В. Павлов – научное руководство, получение данных для анализа, доработка текста.
Р.М. Мустафин – получение данных для анализа, визуализация результатов исследований.

Поступила в редакцию 06.02.2021
После доработки 14.04.2021
Принята к публикации 16.04.2021

Received 06.02.2021
Revised 14.04.2021
Accepted 16.04.2021

Оригинальная статья
УДК 621.787.4
DOI 10.17073/0368-0797-2021-5-330-336

Повышение качества калиброванной стали поверхностным деформированием. Часть 2. Влияние охватывающего поверхностного деформирования на остаточные напряжения в цилиндрических прутках

С. А. Зайдес, Фам Ван Ань, Л. Г. Климова

Иркутский национальный исследовательский технический университет (Россия, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83)

Аннотация. Холоднотянутый металл по сравнению с горячекатаным обладает рядом неоспоримых преимуществ. Повышенная твердость, высокое качество поверхности, стабильность диаметрального размера по длине заготовки являются основанием для выбора калиброванного металла в качестве эффективных заготовок для изготовления длинномерных деталей типа валов, осей, штанг. Такие заготовки в ряде случаев требуют выполнения небольшого объема механической обработки, например, нарезание резьбы или изготовление шеек на концах прутка. Более широкому использованию калиброванного металла препятствуют остаточные напряжения, которые формируются при его изготовлении. В первой части этой статьи предложено использовать малые пластические деформации для управления остаточными напряжениями. На примере нового процесса поверхностного пластического деформирования, который назвали орбитальным выглаживанием, определены рабочие и остаточные напряжения в цилиндрических заготовках. Во второй части статьи рассматривается процесс охватывающего поверхностного пластического деформирования, который при высокой производительности позволяет снижать остаточные напряжения растяжения в калиброванном металле или формировать в поверхностных слоях заготовки напряжения сжатия. Изложена методика экспериментального определения остаточных напряжений в объеме тела, основанная на послойном удалении внутренних и наружных слоев цилиндрических образцов. Установлено влияние основных параметров процесса охватывающего деформирования на компоненты тензора остаточных напряжений. Выявлен диапазон относительных обжатий (0,1 – 1,0 %), при котором в поверхностных слоях заготовки формируются остаточные напряжения сжатия. Установлено, что при относительном обжатии 0,5 % создаются максимальные по величине остаточные напряжения сжатия. Положительное влияние на остаточное напряженное состояние оказывает охватывающее поверхностное деформирование и на холоднотянутый металл – остаточные напряжения растяжения можно уменьшить, снять или преобразовать в сжимающие.

Ключевые слова: охватывающее деформирование, матрица, остаточные напряжения, калиброванная сталь, относительное обжатие, угол рабочего конуса, калибрующая зона

Для цитирования: Зайдес С.А., Фам Ван Ань, Климова Л.Г. Повышение качества калиброванной стали поверхностным деформированием. Часть 2. Влияние охватывающего поверхностного деформирования на остаточные напряжения в цилиндрических прутках // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 330–336. *https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-330-336*

Original article

Quality improvement of calibrated steel by surface deformation. Part 2. Effect of enveloping surface deformation on residual stresses in cylindrical bars

S. A. Zaides, Pham Van Anh, L. G. Klimova

Irkutsk National Research Technical University (83 Lermontova Str., Irkutsk 664074, Russian Federation)

Abstract. Cold-drawn metal has a number of undeniable advantages over the hot-rolled one. Increased hardness, high surface quality, stability of the diametrical dimension along the length of the workpiece are the basis for choosing calibrated metal as effective workpieces for the manufacture of long parts such as shafts, axles, and rods. In some cases, such workpieces require a small amount of machining, for example, threading or making necks at the ends of a bar. The wider use of the calibrated metal is hindered by residual stresses that are formed during its manufacture. In the first part of this article, it was proposed to use small plastic deformations to control residual stresses. By the example of a new process of surface plastic deformation, which is called orbital burnishing, the working and residual stresses in cylindrical workpieces are determined. In the second part of the article, the process of enveloping surface plastic deformation is considered, which, at high productivity, makes it possible to reduce the residual tensile stresses in the calibrated metal or form the surface layers of the workpiece compressive stress. A technique for the experimental determination of residual stresses in the volume of a body is based on layer-by-layer removal of the inner and outer layers of cylindrical samples. Influence of the main parameters of

the enveloping deformation process on the components of the residual stress tensor is established. A range of relative compressions (0.1 – 1.0 %) is revealed, at which residual compressive stresses are formed in the surface layers of the workpiece. It was found that at a relative compression of 0.5 %, the maximum residual compression stresses are created. Enveloping surface deformation has a positive effect on the residual stress state and on cold-drawn metal – the residual tensile stresses can be reduced, removed or converted into compressive ones.

Keywords: enveloping deformation, matrix, residual stresses, calibrated steel, relative reduction, working cone angle, gauge zone

For citation: Zaides S.A., Pham Van Anh, Klimova L.G. Quality improvement of calibrated steel by surface deformation. Part 2. Effect of enveloping surface deformation on residual stresses in cylindrical bars. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 5, pp. 330–336. (In Russ.).
https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-330-336

Введение

Калиброванный металл по сравнению с горячекатаным обладает рядом неоспоримых преимуществ: высокое качество поверхностного слоя, стабильность диаметрального размера по длине прутков, повышенные физико-механические свойства поверхностного слоя [1 – 4]. Благодаря этим достоинствам холоднотянутый металл нередко используют в качестве эффективных заготовок для изготовления длинномерных деталей типа валов, осей, валиков, штанг. Калиброванная сталь нашла широкое применение в качестве заготовок при изготовлении деталей на станках-автоматах и автоматических линиях. Диаметральная точность и низкая шероховатость поверхности обеспечивают надежное закрепление заготовок в цанговых патронах металлорежущих станков.

Несмотря на перечисленные достоинства, калиброванный металл имеет существенный недостаток, который в ряде случаев ограничивает возможности его использования на производстве. Таким недостатком является нестабильность геометрической формы цилиндрических прутков, которая проявляется в их искривлении и поводках. Искажение формы происходит не только при механической обработке калиброванных прутков, но даже при их хранении, а также при сборке и эксплуатации машин и механизмов. Этому явлению особенно подвержены длинномерные цилиндрические детали малой жесткости [5 – 9].

На производстве пытались решить проблему искривления заготовок, используя разные способы их закрепления при обработке, разные условия хранения между операциями, но положительных результатов получить не удалось. Целенаправленное экспериментальное исследование этого вопроса позволило установить, что причиной искривления и искажения формы холоднотянутых прутков являются остаточные напряжения, формирующиеся при холодной пластической деформации металла [10].

Поскольку неравномерность пластических деформаций в объеме заготовки является основной причиной образования технологических остаточных напряжений [10, 11], то для их изменения предлагается использовать малые пластические деформации в поверхностных слоях, которые можно сформировать дополнительной обработкой поверхностным деформированием.

В технологии машиностроения известны отделочно-упрочняющие процессы на основе поверхностного пластического деформирования (ППД), позволяющие сформировать в периферийных слоях цилиндрических деталей остаточные напряжения сжатия. Такие напряжения противоположны по характеру распределения остаточным напряжениям в калиброванных прутках.

В первой части статьи рассмотрен новый процесс на основе орбитального ППД, который целесообразно использовать для обработки коротких по длине заготовок. Но для поверхностного деформирования длинномерных прутков такой процесс является малоэффективным, так как обладает низкой производительностью.

Целью данной работы является оценка возможности использования охватывающей схемы поверхностного пластического деформирования для формирования благоприятных остаточных напряжений или снижения растягивающих напряжений в поверхностных слоях калиброванного металла.

Особенности охватывающего деформационного упрочнения

Методы поверхностного пластического деформирования реализуются, в основном, с использованием инструментов с локальными инденторами [12 – 16]. Для этого на предшествующей механической операции необходимо создать достаточно высокое качество поверхностного слоя. В первую очередь это касается шероховатости поверхности. Локальным методам поверхностного упрочнения свойственны нестабильность деформации при обработке нежестких заготовок, шелушение упрочненного слоя, в ряде случаев незначительное изменение физико-механических свойств обрабатываемого материала. Большинство деформирующих методов локального упрочнения отличается низкой производительностью, особенно при обработке нежестких длинномерных деталей типа валов, осей, штанг, штоков, валиков [17 – 21].

Для поверхностного пластического деформирования нежестких длинномерных заготовок разработан технологический процесс охватывающего упрочнения, основанный на упругопластическом осесимметричном деформировании ограниченной части заготовки при непрерывном поступательном ее перемещении относительно продольной оси [9].

В качестве рабочего деформирующего инструмента при этом используют кольцевой индентор – матрицу. Рабочий инструмент состоит из трех основных частей:

– рабочей, имеющей форму усеченного конуса, в которую поступает и формоизменяется заготовка;

– калибрующей (цилиндрической) части, предназначенной для выравнивания напряженного состояния и обеспечения качества поверхности заготовки;

– выходной части в виде обратного конуса, служащего в основном для предохранения рабочего канала инструмента от повреждений [9].

Таким образом, основными параметрами охватывающего поверхностного пластического деформирования являются геометрия рабочего канала инструмента и степень относительного обжатия Q, определяемая по формуле

$$Q = \frac{D_н^2 - D_к^2}{D_н^2} 100\ \%, \qquad (1)$$

где $D_н$, $D_к$ – диаметр заготовки до и после деформирования.

Методика определения остаточных напряжений

Для определения остаточных напряжений в сплошных цилиндрических заготовках использован метод растачивания и обтачивания одного цилиндра, разработанный Г. Заксом и модифицированный Л.А. Гликманом и А.Н. Бабаевым [9]. В основе метода лежат происходящие изменения тангенциальных и осевых деформаций цилиндра при последовательном удалении внутренних (наружных) концентрических слоев металла. По результатам измерения деформаций в осевом и радиальном направлении цилиндрического образца рассчитывали главные компоненты тензора остаточных напряжений.

Исследования выполнены на цилиндрических образцах из стали АС14 вследствие ее предрасположенности к трещинообразованию при обработке давлением и резанием, что объясняется формированием значительных остаточных напряжений [22]. Остаточные напряжения определяли в цилиндрических заготовках диаметром 38 мм, деформированных в заводских и лабораторных условиях.

Для проведения лабораторных исследований заготовки длиной 400 мм калибровали на гидравлической машине ГРМ-1, а в заводских условиях прутки длиной шесть метров протягивали на калибровочных машинах (ИЗТМ). В качестве рабочего инструмента использовали твердосплавные матрицы (ВК8), запрессованные в стальные обоймы. В качестве технологической смазки при калибровке прутков применяли масло индустриальное И-40А (ГОСТ 20799-75).

Для удаления внутренних и наружных концентрических слоев цилиндрических образцов использовали механический разрушающий способ: сверление и последующее растачивание и обтачивание. Деформации цилиндрических образцов при удалении слоев металла замеряли микроиндикаторами часового типа [9].

Влияние основных параметров охватывающего деформирования на остаточные напряжения в цилиндрических прутках

Исследования выполнены на отожженных образцах, что исключало наличие начальных остаточных напряжений в металле.

Степень относительного обжатия. Для определения влияния степени относительного обжатия на остаточные напряжения, заготовки из стали АС14 диаметром 38 мм упрочняли охватывающим деформированием через матрицу с углом рабочего конуса 8° и длиной калибрующей части 4 мм. Для определения интервала обжатий, при котором в поверхностных слоях деформированных прутков формируются остаточные напряжения сжатия, эксперименты были выполнены с относительными обжатиями от 0,1 до 5,0 %.

Установлено, что величина и характер распределения всех составляющих остаточных напряжений в значительной мере зависит от степени относительного обжатия (рис. 1). После обобщения полученных результатов исследования, на рис. 2 представлены кривые, показывающие влияние степени относительного обжатия на осевые остаточные напряжения на поверхности прутков, упрочненных охватывающим ППД.

В интервале относительных обжатий от 0,1 до 1,0 % в поверхностных слоях цилиндрических прутков формируются остаточные напряжения сжатия, а при

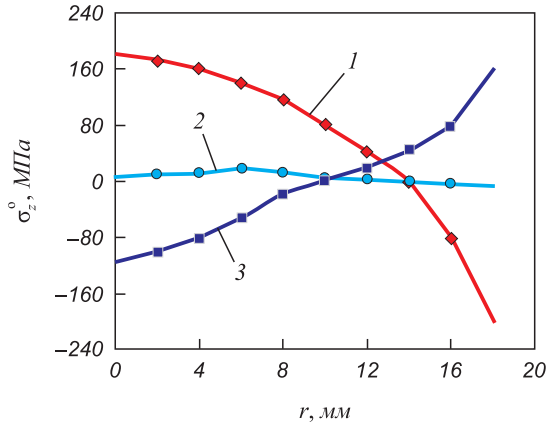


Рис. 1. Распределение осевых σ_z^o остаточных напряжений по радиусу упрочненных прутков:
1 – Q = 0,27 %; *2* – Q = 1,0 %; *3* – Q = 2,0 %

Fig. 1. Distribution of axial residual stresses σ_z^o over the cross-section of hardened bars:
1 – Q = 0.27 %; *2* – Q = 1.0 %; *3* – Q = 2.0 %

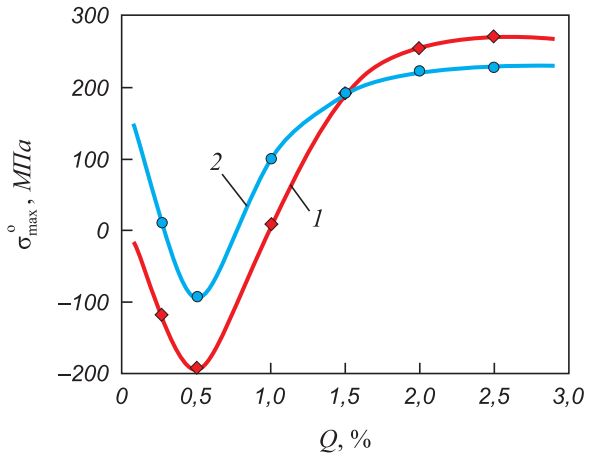


Рис. 2. Влияние степени относительного обжатия на максимальные значения осевых остаточных напряжений:
1 – прутки без начальных остаточных напряжений (отожженные);
2 – калиброванные прутки (с обжатием Q = 18 %)

Fig. 2. Influence of the relative reduction degree on the maximum values of axial residual stresses:
1 – annealed rods; *2* – calibrated rods (Q = 18 %)

Q > 1,0 % – растяжения. Причем при относительных обжатиях в интервале 0,4 – 0,6 % формируются максимальные остаточные напряжения сжатия (см. рис. 2). С увеличением степени относительного обжатия более 3 % характер изменения остаточных напряжений становится более монотонным.

Геометрия рабочего канала инструмента. Основными геометрическими параметрами матрицы являются угол рабочего конуса и длина калибрующей части. Для определения их влияния на остаточное напряженное состояние упрочненных стальных прутков была подготовлена серия рабочих матриц (сталь ШХ-15), которые отличались указанными параметрами.

Установлено, что в исследуемом диапазоне геометрических параметров матрицы (α = 6 – 15°; $l_к$ = = 0,1 – 15 мм) в поверхностных слоях глубиной до 5 – 6 мм формируются остаточные напряжения сжатия, имеющие максимальные значения на поверхности цилиндрических образцов.

По результатам обобщения экспериментальных результатов установлено, что при увеличении рабочего угла матрицы α от 6 до 15° максимальные осевые и тангенциальные остаточные напряжения сжатия снижаются, а с увеличением длины калибрующей части матрицы – увеличиваются [9].

Технологическая наследственность при формировании остаточных напряжений

Рассмотрим, как влияет процесс охватывающего ППД на изменение остаточного напряженного состояния в калиброванных прутках, которые после обработки обычно имеют растягивающие остаточные напряжения в поверхностных слоях.

Степень относительного обжатия. Учитывая, что охватывающее поверхностное пластическое деформирование оказывает эффективное влияние на изменения величины и характера распределения остаточных напряжений, было сделано предположение о возможности его применения для изменения остаточного напряженного состояния заготовок, полученных холодным деформированием.

Выполненные экспериментальные исследования подтвердили положительное воздействие охватывающего ППД. Так, при относительном обжатии величиной 0,30 % максимальные тангенциальные напряжения растяжения в калиброванном металле снизились в три, а осевые – в два раза (рис. 3). Кроме того, изменился и характер распределения остаточных напряжений по поперечному сечению калиброванных прутков. Максимальные осевые остаточные напряжения растяжения в поверхностных слоях (+250 МПа) преобразовались в напряжения сжатия (–240 МПа). Эксперименты, выполненные в заводских условиях, подтвердили лабораторные результаты. Так, в калиброванных заготовках,

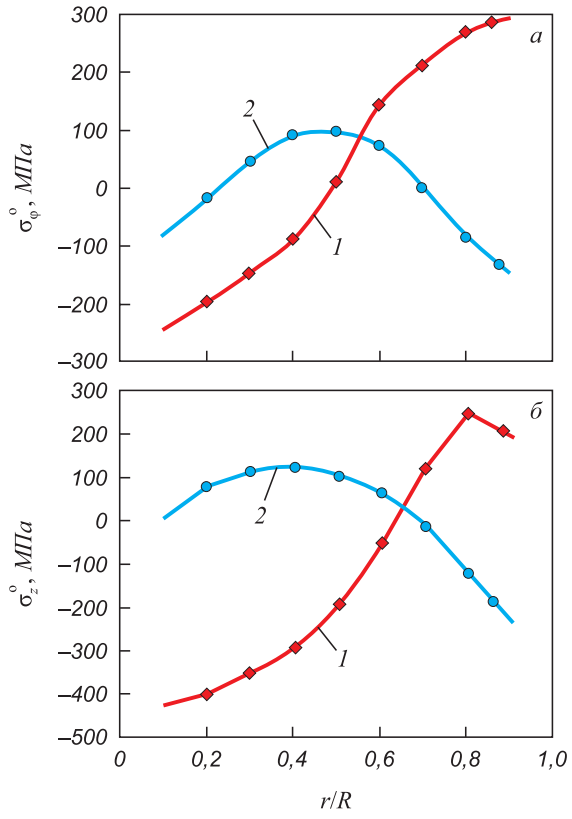


Рис. 3. Распределение тангенциальных (*а*) и осевых (*б*) остаточных напряжений по радиусу упрочненных заготовок:
1 – напряжения в исходной (калиброванной) заготовке;
2 – напряжения в заготовке после дополнительного охватывающего ППД с относительным обжатием 0,3 % r/R

Fig. 3. Distribution of tangential (*a*) and axial (*б*) residual stresses over the cross-section of hardened workpieces during enveloping deformation:
1 – in original workpiece; *2* – after enveloping deformation with a compression of 0.3 % r/R

упрочненных дополнительно с относительным обжатием 0,15 и 0,68 %, максимальные осевые растягивающие остаточные напряжения снизились, соответственно, с 270 до 91 и 190 МПа, а тангенциальные – с 300 до 140 и 180 МПа [9]. В данном случае также происходит значительное снижение начальных остаточных напряжений, но без изменения характера их распределения. После обобщения результатов исследования были построены кривые, показывающие изменение остаточных напряжений в калиброванном металле при использовании дополнительной обработки охватывающим ППД (см. рис. 2). Максимальные остаточные напряжения растяжения в заготовках после предшествующей технологической операции (калибровки) составляли 225 МПа. Для изменения остаточного напряженного состояния калиброванные заготовки упрочняли охватывающим деформированием с обжатиями в пределах от 0,1 до 2,0 %. Экспериментально установлено (см. рис. 2), что при охватывающем ППД имеются два значения относительных обжатий, при которых начальные остаточные напряжения снижаются до нуля. Из графика на рис. 2 установлен также диапазон относительных обжатий (0,15 – 0,60 %), при котором в заготовках формируются остаточные напряжения сжатия.

Совмещение технологических переходов. Предлагаемый способ изменения остаточных напряжений в калиброванном металле основан на использовании дополнительной технологической операции. Для повышения производительности технологического процесса калибровки охватывающее деформирование целесообразно совмещать с основным технологическим процессом путем использования рабочего инструмента в виде сдвоенных матриц. Рассмотрим влияние совмещенного перехода на остаточное напряженное состояние в образцах, упрочненных с относительным обжатием 18 %, а затем дополнительно с относительным обжатием 0,72 %.

При раздельном деформировании за два перехода максимальные значения тангенциальных остаточных напряжений растяжения снизились с 250 до 100 МПа (рис. 4), а осевых – с 210 до 80 МПа [9]. При охватывающем деформировании за один переход с помощью сдвоенной матрицы в периферийных слоях заготовки сформировались тангенциальные напряжения сжатия (–100 МПа, см. рис. 4), а уровень осевых напряжений растяжения снизился до 120 МПа [9].

В заключении следует отметить, что процесс охватывающего упрочения, который в производственных условиях можно реализовывать на калибровочных станах, является суперпроизводительным по сравнению с процессами, основанными на использовании локальных инденторов (шарики, ролики, алмазные выглаживатели). Так, если при обкатывании роликом использовать продольную подачу величиной 0,1 мм/об при частоте вращения заготовки 500 об/мин, а скорость перемещения заготовки на калибровочном стане принять

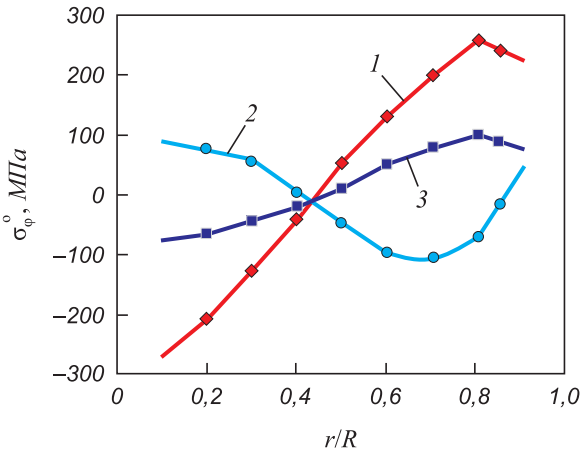


Рис. 4. Распределение тангенциальных остаточных напряжений по радиусу калиброванных прутков:
1 – исходный калиброванный металл (Q = 18 %); *2* – охватывающее деформирование калиброванного металла через сдвоенную матрицу; *3* – охватывающее деформирование калиброванного металла за два перехода

Fig. 4. Curves of tangential residual stresses distribution over the cross-section of calibrated bars:
1 – calibrated metal (Q = 18 %); *2* – enveloping deformation of the calibrated metal through a double matrix; *3* – enveloping deformation of the calibrated metal in two transitions

10 м/мин, то указанные процессы по производительности будут отличатся в 200 раз.

Следует также отметить и поля распределения остаточных напряжений сжатия в зависимости от способов деформирования. При охватывающем деформировании глубина залегания остаточных напряжений сжатия в 4 – 6 раз выше, чем при локальном упрочнении [19], что позволяет использовать этот технологический процесс для изменения остаточных напряжений в калиброванном металле.

Выводы

Для отделочно-упрочняющей обработки длинномерных цилиндрических деталей предложен технологический процесс, основанный на охватывающем деформировании заготовок. Экспериментально установлен диапазон относительных обжатий в пределах от 0,1 до 1,0 %, при котором в поверхностных слоях заготовки формируются осевые и тангенциальные остаточные напряжения сжатия.

Установлена роль геометрии рабочего канала инструмента на формирование остаточных напряжений. Подтверждено, что с увеличением угла рабочего конуса инструмента все главные компоненты тензора остаточных напряжений повышаются. Установлено влияние калибрующей части инструмента на остаточные напряжения – с ее увеличением остаточное напряженное состояние снижается.

Охватывающее поверхностное пластическое деформирование целесообразно использовать для изменения

остаточных напряжений в калиброванном металле. Так, при степени относительного обжатия в интервале от 0,15 до 0,6 % в поверхностных слоях цилиндрических прутков формируются остаточные напряжения сжатия. Для повышения производительности технологического процесса целесообразно использовать сдвоенные матрицы, обеспечивающие охватывающее деформирование в основном процессе калибровки металла.

Список литературы / References

1. Кандауров Е.Л., Кривощеков С.В., Носов А.Д., Бахчеев Д.Н., Алексеев А.Н. Перспективы производства калиброванного проката // Сталь. 2005. № 1. С. 70–71.
2. Корчунов А.Г., Рудаков В.П., Пивоварова К.Г. Влияние способа обработки на состояние поверхности калиброванного металла // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2003. № 3. С. 41–42.
3. Вершигора С.М., Черняк А.А., Рудаков В.П., Чупин А.А. Совершенствование производства калиброванного и обточенного проката из автоматных и легированных сталей // Сталь. 2004. № 2. С. 39–40.
4. Totten G., Howes M., Inoue T. Handbook of residual stress and deformation of steel. USA: ASM International, Materials Park, Ohio, 2002. 500 p.
5. Swic A., Taranenko V., Wolos D. New method for machining of low-rigidity shafts // Advances in Manufacturing Science and Technology. 2010. Vol. 34. No. 1. P. 59–71.
6. Bisu C.-F., K'Nevez J.Y., Darnis P., Laheurte R., Gerard A. New method to characterize a machining system: application in turning // International Journal of Material Forming. 2009. Vol. 2. No. 2. P. 93–105. http://doi.org/10.1007/s12289-009-0395-y
7. Drachev O.I., Bobrovskii A.V. Automatic stabilization systems of the non-rigid shafts in turning work // AER – Advances in Engineering Research. 2018. Vol. 158. P. 104–108.
8. Drachev O.I., Bobrovskii A.V., Zotov A.V. Improving the accuracy of machining of non-rigid shaft // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 224. Article 01085. http://doi.org/10.1051/matecconf/201822401085
9. Зайдес С.А. Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного технического университета, 2001. 309 с.
10. Блюменштейн В.Ю., Махалов М.С. Расчетная модель остаточных напряжений упрочненного поверхностного слоя после обработки поверхностным пластическим деформированием // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 4 (100). С. 12–20.
11. Rakhimyanov Kh.M., Rakhimyanov K.Kh., Rakhimyanov A.Kh. Estimating the parameters of deformation action by ultrasonic surface hardening of metals // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 253. No. 1. Article 012032. http://doi.org/10.1088/1757-899X/253/1/012032
12. Григорьев С.Н., Кропоткина Е.Ю. Выбор оптимального способа поверхностного пластического деформирования // Вестник МГТУ Станкин. 2012. № 2. С. 144–147.
13. Rakhimyanov Kh.M., Semenova Yu.S., Eremina A.S. Technological restrictions on mode parameters of ultrasonic plastic deforming // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 253. No. 1. Article 012030. http://doi.org/10.1088/1757-899X/253/1/012030
14. Tamarkin M., Tischenko E., Kazakov D. The research process of the finishing strengthening centrifugal and rotary processing method of parts considering the reliability assurance of the technology process // 2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering, ICMSC. 2017. P. 31–35. http://doi.org/10.1109/ICMSC.2017.7959437
15. Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Правка маложестких цилиндрических деталей. Часть 2. Напряженное состояние цилиндрических заготовок при поперечной обкатке плоскими плитами // Известия вузов. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 9. С. 674–680. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-674-680

1. Kandaurov E.L., Krivoshchekov S.V., Nosov A.D., Bakhcheev D.N., Alekseev A.N. Prospects for manufacturing the sized rolled products. *Stal'*. 2005, no. 1, pp. 70–71. (In Russ.).
2. Korchunov A.G., Rudakov V.P., Pivovarova K.G. Influence of the processing method on state of the calibrated metal surface. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2003, no. 3, pp. 41–42. (In Russ.).
3. Vershigora S.M., Chernyak A.A., Rudakov V.P., Chupin A.A. Improvement in manufacturing the sized rolled products. *Stal'*. 2004, no. 2, pp. 39–40. (In Russ.).
4. Totten G., Howes M., Inoue T. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. ASM International, Materials Park, Ohio, 2002, 500 p.
5. Swic A., Taranenko V., Wolos D. New method for machining of low-rigidity shafts. *Advances in Manufacturing Science and Technology*. 2010, vol. 34, no. 1, pp. 59–71.
6. Bisu C.-F., K'Nevez J.Y., Darnis P., Laheurte R., Gerard A. New method to characterize a machining system: application in turning. *International Journal of Material Forming*. 2009, vol. 2, no. 2, pp. 93–105. http://doi.org/10.1007/s12289-009-0395-y
7. Drachev O.I., Bobrovskii A.V. Automatic stabilization systems of the non-rigid shafts in turning work. *AER – Advances in Engineering Research*. 2018, vol. 158, pp. 104–108.
8. Drachev O.I., Bobrovskii A.V., Zotov A.V. Improving the accuracy of machining of non-rigid shaft. *MATEC Web of Conferences*. 2018, vol. 224, article 01085. http://doi.org/10.1051/matecconf/201822401085
9. Zaides S.A. *Enveloping Surface Plastic Deformation*. Irkutsk: IrSTU, 2001, 309 p.
10. Blumenstein V.Yu., Makhalov M.S. Computational model of residual stresses of a hardened surface layer after surface plastic deformation. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2013, no. 4 (100), pp. 12–20. (In Russ.).
11. Rakhimyanov Kh.M., Rakhimyanov K.Kh., Rakhimyanov A.Kh. Estimating the parameters of deformation action by ultrasonic surface hardening of metals. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, vol. 253, no. 1, article 012032. http://doi.org/10.1088/1757-899X/253/1/012032
12. Grigor'ev S.N., Kropotkina E.Yu. The choice of the optimal method for surface plastic deformation. *Vestnik MGTU Stankin*. 2012, no. 2, pp. 144–147. (In Russ.).
13. Rakhimyanov Kh.M., Semenova Yu.S., Eremina A.S. Technological restrictions on mode parameters of ultrasonic plastic deforming. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, vol. 253, no.1, article 012030. http://doi.org/10.1088/1757-899X/253/1/012030
14. Tamarkin M., Tischenko E., Kazakov D. The research process of the finishing strengthening centrifugal and rotary processing method of parts considering the reliability assurance of the technology process. *2017 Int. Conf. on Mechanical, System and Control Engineering, ICMSC*. 2017, pp. 31–35. http://doi.org/10.1109/ICMSC.2017.7959437
15. Zaides S.A., Le Khong Kuang. Straightening of low-rigid cylindrical details. Part 2. Stressed state of cylindrical billets at transverse cheesing by flat plates. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 9, pp. 674–680. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-674-680

16. Зайдес С.А., Нго Као Кыонг. Новые технологические возможности отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2017. № 3 (69). С. 25–30.
17. Tiitto S. Magnetic Methods // Handbook of Measurement of Residual Stresses. Lu J. ed. Lilburn, GA: Society for Experimental Mechanics, 1996. P. 179–224.
18. Smolentsev V.P., Kirillov O.N., Fedonin O.N., Ryazantsev A.Yu. Combined finish machining of nonrigid parts by brush electrode // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 177. Article 012009.
https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012009
19. Зайдес С.А, Фам Ван Ань. Повышение качества калиброванной стали поверхностным деформированием. Часть 1. Определение напряженного состояния цилиндрических деталей при орбитальном поверхностном деформировании // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 10. С. 802–807.
https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-10-802-807
20. Mahalov M.S., Blumenstein V.Yu. Finite element surface layer inheritable condition residual stresses model in surface plastic deformation processes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 126. Article 012004.
https://doi.org/10.1088/1757-899X/126/1/012004
21. Ebert L.J. The role of residual stresses in the mechanical performance of case carburized steel // Metallurgical and Materials Transactions A. 1978. Vol. 9. No. 11. P. 1537–1551.
https://doi.org/10.1007/BF02661936
22. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. А.С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.

16. Zaides S.A., Ngo Kao Kyong. New technological possibilities of finishing and hardening treatment by surface plastic deformation. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*. 2017, no. 3 (69), pp. 25–30. (In Russ.).
17. Tiitto S. Magnetic Methods. In: *Handbook of Measurement of Residual Stresses*. Lu J. ed. Lilburn, GA: Society for Experimental Mechanics, 1996, pp. 179–224.
18. Smolentsev V.P., Kirillov O.N., Fedonin O.N., Ryazantsev A.Yu. Combined finish machining of nonrigid parts by brush electrode. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2017, vol. 177, article 012009.
https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012009
19. Zaides S.A, Pham Van Anh. Quality improvement of calibrated steel by surface deformation. Part 1. Determination of the stressed state of cylinderical parts during orbital surface deformation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 10, pp. 802–807. (In Russ.).
https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-10-802-807
20. Mahalov M.S., Blumenstein V.Yu. Finite element surface layer inheritable condition residual stresses model in surface plastic deformation processes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 126, no. 1, article 012004.
https://doi.org/10.1088/1757-899X/126/1/012004
21. Ebert L.J. The role of residual stresses in the mechanical performance of case carburized steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1978, vol. 9, no. 11, pp. 1537–1551.
https://doi.org/10.1007/BF02661936
22. Zubchenko A.S., Koloskov M.M., Kashirskii Yu.V., etc. *Grade Guide of Steels and Alloys*. Zubchenko A.S. ed. Moscow: Mashinostroyenie, 2003, 784 p. (In Russ.).

Сведения об авторах / Information about the authors

Семен Азикович Зайдес, *д.т.н., профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и материалов,* Иркутский национальный исследовательский технический университет
E-mail: zsa@istu.edu

Фам Ван Ань, *аспирант кафедры машиностроительных технологий и материалов,* Иркутский национальный исследовательский технический университет
E-mail: vananhtdh0202@gmail.com

Лариса Генриховна Климова, *к.т.н., доцент кафедры инженерной и компьютерной графики,* Иркутский национальный исследовательский технический университет
E-mail: larisgoko@yandex.ru

Semen A. Zaides, *Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair "Engineering Technology and Materials",* Irkutsk National Research Technical University
E-mail: zsa@istu.edu

Pham Van Anh, *Postgraduate of the Chair "Engineering Technology and Materials",* Irkutsk National Research Technical University
E-mail: vananhtdh0202@gmail.com

Larisa G. Klimova, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Engineering and Computer Graphics",* Irkutsk National Research Technical University
E-mail: larisgoko@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.01.2021
После доработки 18.02.2021
Принята к публикации 16.04.2021

Received 12.01.2021
Revised 18.02.2021
Accepted 16.04.2021

Оригинальная статья
УДК 629.225.033
DOI 10.17073/0368-0797-2021-5-337-344

Метод учета остаточных технологических напряжений при моделировании напряженно-деформированного состояния диска железнодорожного колеса. Сообщение 1

С. А. Снитко [1], А. В. Яковченко [1], С. М. Горбатюк [2]

[1] **Донецкий национальный технический университет** (Украина, 83001, Донецк, ул. Артема, 58)
[2] **Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»** (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

Аннотация. Важным аспектом повышения точности прогноза напряженно-деформированного состояния дисков железнодорожных колес при действии эксплуатационных нагрузок является учет остаточных технологических напряжений. Настоящая работа посвящена разработке метода учета остаточных технологических напряжений в дисках колес, который обеспечит универсальность подхода и точность расчетов. Анализ напряжений в диске колеса от действия монтажной (натяга между ступицей и осью) и эксплуатационной нагрузки выполнен на основе результатов конечно-элементного моделирования. Проверка адекватности используемой модели проведена путем сравнения расчетной информации с экспериментальными данными АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта». Анализ расчетных и экспериментальных значений радиальных напряжений выполняли для наиболее нагруженных при эксплуатации (опасных) зон диска – зон его сопряжения с ободом и ступицей. Установлено, что заданием величины натяга больше фактической можно получить образование в колесе дополнительных напряжений, которые с достаточной степенью точности отражают влияние остаточных технологических напряжений на напряженно-деформированное состояние диска. На примере расчета колеса с плоскоконическим диском (ГОСТ 10791 – 2011) показано, что увеличение величины натяга на 60 % (с 0,25 до 0,4 мм на диаметр) позволяет адекватно спрогнозировать значения напряжений в наиболее опасных зонах диска. Максимальные относительные отклонения расчетных показателей радиальных напряжений от экспериментальных и по наружной, и по внутренней сторонам колеса, не превышают 14 %. Несмотря на простоту реализации, предлагаемый метод обеспечивает повышение точности прогноза прочностных характеристик колес, а также возможность его использования для различных типоразмеров колес.

Ключевые слова: железнодорожное колесо, напряженно-деформированное состояние, эксплуатационные нагрузки, конечно-элементное моделирование, напряжения в диске, остаточные напряжения, натяг между ступицей и осью, диск колеса

Для цитирования: Снитко С.А., Яковченко А.В., Горбатюк С.М. Метод учета остаточных технологических напряжений при моделировании напряженно-деформированного состояния диска железнодорожного колеса. Сообщение 1 // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 337–344. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-337-344

Original article

Accounting method for residual technological stresses in modeling the stress-deformed state of a railway wheel disk. Report 1

S. A. Snitko [1], A. V. Yakovchenko [1], S. M. Gorbatyuk [2]

[1] **Donetsk National Technical University** (58 Artema Str., Donetsk 83001, Ukraine)
[2] **National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS)** (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

Abstract. The work is devoted to development of a method for accounting residual technological stresses in wheel disks, which will provide both the versatility of the approach and the accuracy of calculations. The analysis of stresses in the wheel disk from the action of assembly (interference between the hub and the axle) and operational loads is carried out on basis of the results of finite element modeling. Verification of adequacy of the used model was made by comparing the calculated information with the experimental data of JSC "VNIIZHT". The analysis of calculated and experimental values of radial stresses was carried out for the most loaded (critical) zones of the disk during operation – the zones of its interface with the rim and the hub. It was found that by setting the interference fit value to be greater than the actual one, it is possible to obtain the formation of additional stresses in the wheel, which, with a sufficient degree of accuracy, reflect the effect of residual technological stresses on its stress-strain state. On the example of calculating a wheel with a flat-conical disk (GOST 10791 – 2011), it is shown that an increase in the interference fit value by 60 % (from 0.25 mm to 0.4 mm per diameter) makes it possible to adequately predict the magnitude of stresses in the most critical disk elements. The maximum relative deviations of the calculated values of radial stresses from the experimental ones, both along the outer and inner sides of the

wheel, do not exceed 14 %. Despite the simplicity of implementation, the proposed method provides an increase in the accuracy of predicting the strength characteristics of wheels, as well as the possibility of using it for various standard wheel sizes.

Keywords: railway wheel, stress-strain state, operational loads, finite element modeling, stresses in disk, residual stresses, interference between hub and axle, wheel disc

For citation: Snitko S.A., Yakovchenko A.V., Gorbatyuk S.M. Accounting method for residual technological stresses in modeling the stress-deformed state of a railway wheel disk. Report 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 5, pp. 337–344. (In Russ.).
https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-337-344

Введение

Повышение срока службы железнодорожных колес является актуальной научно-практической задачей [1 – 26]. Эффективность ее решения во многом зависит от точности прогноза напряженно-деформированного состояния (НДС) дисков колес при действии эксплуатационных нагрузок [4, 12 – 26]. Одним из важнейших аспектов при этом выступает необходимость учета остаточных напряжений, которые появляются в штампованно-катаных колесах на различных стадиях их производства и неизбежно вызывают соответствующие изменения НДС дисков колес, от прочности которых существенно зависит эксплуатационный ресурс колеса в целом [12, 13, 21, 24, 25].

В современных условиях анализ НДС колес при различных схемах их нагружения выполняют в системах компьютерного конечно-элементного моделирования по специальным методикам, оговоренным соответствующими нормативными документами [14 – 25]. При этом виды как механических, так и тепловых нагрузок, используемые в различных методиках, в целом подобны, но их значения могут существенно отличаться [24]. Объяснить данный факт можно специфическими условиями эксплуатации колес (рельеф местности, технические характеристики железнодорожного пути и др.), которые характерны для различных регионов мира [27]. Вместе с тем, такой важный фактор, как остаточные технологические напряжения, которые всегда появляются в штампованно-катаных колесах, независимо от технологии их производства, учитывают далеко не всегда [21, 24, 25].

Следует отметить, что расчет остаточных напряжений в диске является достаточно сложной задачей, так как первичное поле остаточных напряжений появляется в колесе в процессе его остывания после прессопрокатной линии, а затем оно меняется при последующих операциях термической и механической обработок колеса, а в ряде случаев и упрочняющей обработки диска дробью. При этом, как известно из практики производства колес, в процессе выполнения вышеуказанных операций происходит необратимое изменение размеров колес. Причем даже для колес в пределах одной партии эти изменения будут отличаться, что связано с технологически допустимым колебанием размеров черновых колес в пределах поля допусков.

При расчете поля остаточных технологических напряжений в готовом чистовом колесе требуется учет большого количества факторов, определяющих необходимость многостадийного моделирования протекающих в металле физических процессов [21, 24, 28 – 30]. При этом нужно использовать несколько математических моделей и широкий набор свойств материала, которые необходимы для моделирования процессов межфазного преобразования, упругопластической деформации и тепломассопереноса. Нужна и соответствующая база экспериментальной информации для корректного задания начальных и граничных условий при решении краевых задач, а также для оценки адекватности результатов моделирования вышеуказанных технологических операций.

Данные обстоятельства затрудняют интерпретацию и совместимость получаемых на разных этапах моделирования результатов, а также существенно усложняют процесс отладки модели в целом. Очевидно поэтому такой подход не получил широкого распространения в инженерной практике и в соответствующей нормативной документации. Поэтому целью работы является создание метода учета остаточных технологических напряжений в дисках железнодорожных колес, обеспечивающего при моделировании напряженно-деформированного состояния дисков железнодорожных колес универсальность подхода и точность расчетов.

Методика исследования

Известно [13, 31, 32], что остаточные технологические напряжения вызывают появление в поверхностных слоях диска напряжений, которые могут, в зависимости от вида и режимов отделочных операций, существенно различаться не только по величине, но и по знаку. Конечно-элементное моделирование НДС колес на каждой стадии отделочных операций, как было отмечено выше, весьма проблематично.

Перед эксплуатацией колеса запрессовывают на ось с натягом. Эта операция вызывает дополнительные напряжения разного знака и величины, показанные на рис. 1. Причем моделирование НДС колес с учетом натяга между ступицей и осью затруднений не вызывает.

Анализ имеющихся данных [13, 31, 32] позволяет сделать вывод о том, что дополнительные напряжения от натяга между ступицей и осью могут быть подобны остаточным технологическим напряжениям в дисках железнодорожных колес. Таким образом, можно пред-

положить, что, назначив при моделировании величину натяга несколько большую, чем требуется, можно получить образование в колесе дополнительных напряжений, которые с достаточной степенью точности будут отражать влияние остаточных технологических напряжений на НДС диска колеса.

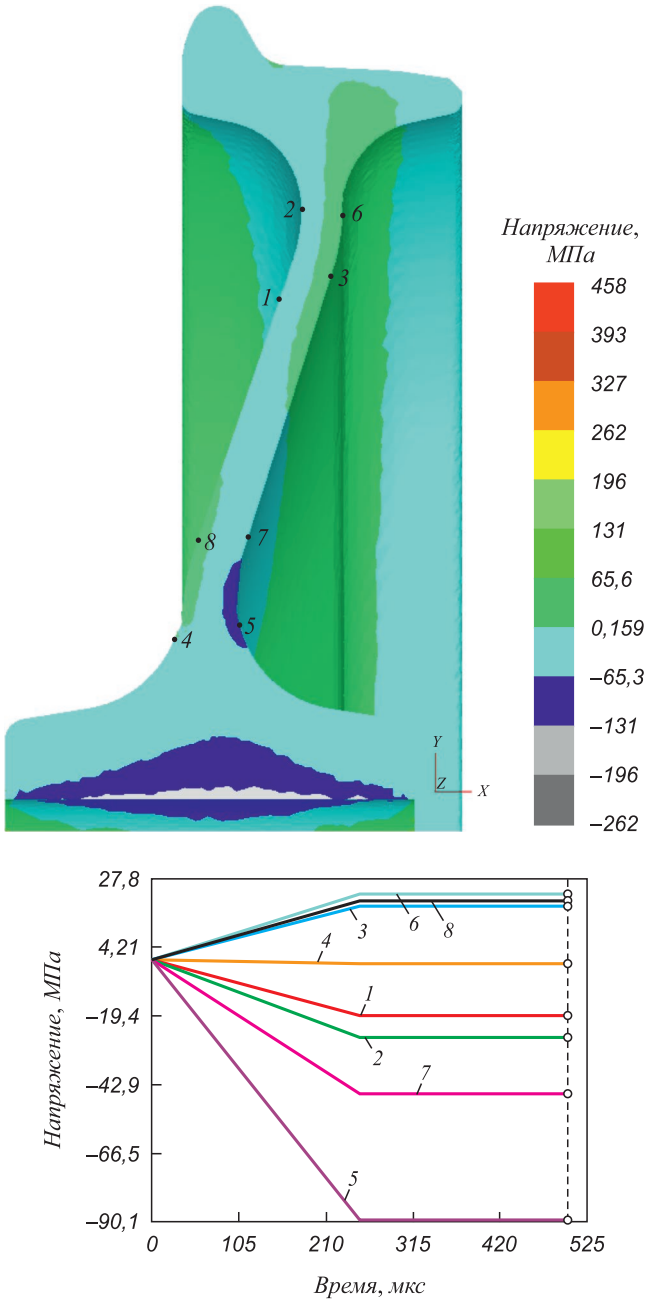


Рис. 1. Результаты расчета радиальных напряжений в диске стандартного колеса с плоскоконическим диском (ГОСТ 10791 – 2011), полученные путем конечно-элементного моделирования натяга 0,25 мм (с учетом обточки обода до толщины 22 мм), МПа:
1 – –19,5; *2* – –27,0; *3* – 18,1; *4* – –1,75; *5* – –90,1; *6* – 22,2; *7* – –46,6; *8* – 19,6

Fig. 1. Results of calculating the radial stresses in the disk of standard wheel with a flat-conical disk (GOST 10791 – 2011), obtained by finite element modeling of interference fit of 0.25 mm (taking into account turning the rim to a thickness of 22 mm), MPa:
1 – –19.5; *2* – –27.0; *3* – 18.1; *4* – –1.75; *5* – –90.1; *6* – 22.2; *7* – –46.6; *8* – 19.6

Для проверки данной гипотезы была выбрана конструкция колеса диаметром 957 мм с плоскоконическим диском [33], которое наиболее широкое используется на железных дорогах стран СНГ и характеристики которого на данный момент наиболее полно изучены.

Анализ НДС колеса выполняли путем конечно-элементного моделирования в системе DEFORM 3D. При этом решали объемную задачу для 1/2 колеса. Точность моделирования геометрии колеса и учет неравномерности распределения напряжений в колесе при его нагружении обеспечены путем измельчения сетки конечных элементов в диапазоне 1,5 – 4,5 мм в зонах дуг окружностей диска, а также дуг сопряжения диска с ободом и ступицей. Как показали расчеты, дальнейшее измельчение сетки нецелесообразно, так как это дает уточнение результатов не более, чем на 5 МПа при существенном увеличении времени расчета.

В качестве материала колеса из библиотеки DEFORM 3D выбрана высокоуглеродистая сталь: модуль Юнга – 210 ГПа; коэффициент Пуассона – 0,3. Тип объекта – упругий.

Адаптация методики конечно-элементного моделирования выполнялась применительно к условиям экспериментальных исследований НДС колес, выполненных в АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (ВНИИЖТ) на специализированной испытательной машине [16]. При этом были учтены:

– жесткая заделка отверстия ступицы;
– натяг при запрессовке колеса на ось;
– обточка обода до толщины 22 мм.

Величина натяга между ступицей и осью составляла 0,25 мм на диаметр [34].

Проверка адекватности используемой конечно-элементной модели выполнена путем сравнения расчетной информации с экспериментальными данными АО «ВНИИЖТ», полученными для случая приложения вертикальной нагрузки 800 кН к гребню колеса. При этом сравнивали величины радиальных напряжений в диске по наружной и внутренней поверхностям колеса (рис. 1).

Результаты исследования

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных значений радиальных напряжений (табл. 1) выполняли для наиболее нагруженных (опасных) при эксплуатации зон диска. Это зоны его сопряжения с ободом и ступицей. Для получения более объективной и полной информации значения напряжений фиксировали с наружной и внутренней сторон колеса в четырех точках, по две точки на каждую опасную зону диска (рис. 2).

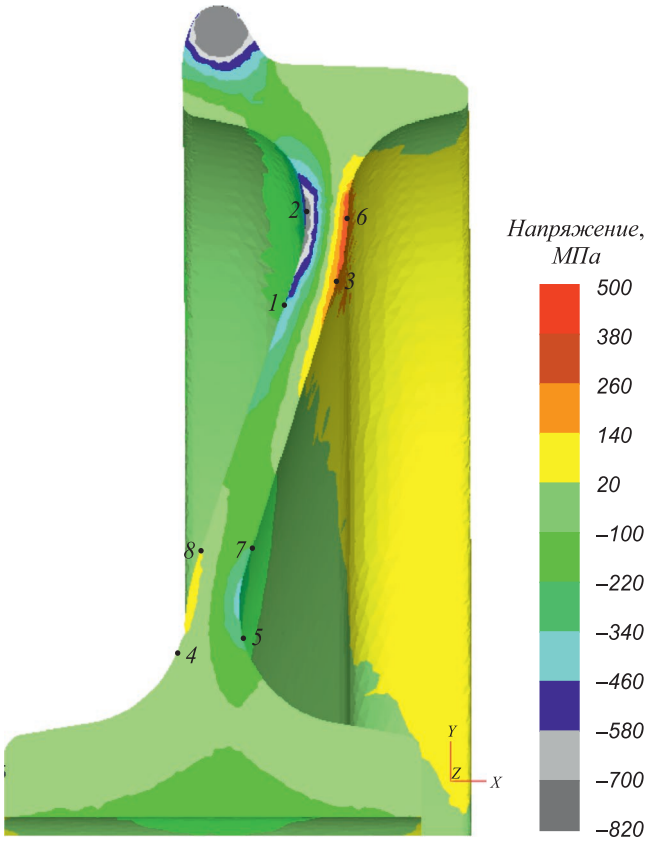


Рис. 2. Результаты расчета радиальных напряжений в диске стандартного колеса, полученных от вертикальной нагрузки на гребень и натяга 0,25 мм, МПа:
1 – –471; *2* – –804; *3* – 285; *4* – –11,2; *5* – –280; *6* – 373; *7* – –228; *8* – 22,6

Fig. 2. Results of calculating the radial stresses in the disk of standard wheel, obtained from vertical load on the flange and interference fit of 0.25 mm, MPa:
1 – –471; *2* – –804; *3* – 285; *4* – –11.2; *5* – –280; *6* – 373; *7* – –228; *8* – 22.6

Как показал анализ полученных результатов моделирования (табл. 1), расчетные значения напряжений на качественном уровне (знак напряжения) в целом соответствуют экспериментальным данным. Однако, как видно из табл. 1, полученные максимальные отклонения, во-первых, весьма существенны, а, во-вторых, дают заниженную оценку напряжений в опасных зонах диска.

Выполненная серия аналогичных расчетов с различными величинами натяга позволила установить, что для данного типа колеса и условий нагружения за-

Таблица 1

Результаты сравнения расчетных значений радиальных напряжений в диске, полученных от вертикальной нагрузки на гребень и натяга 0,25 мм, с экспериментальными данными

Table 1. **Results of comparing the calculated values of radial stresses in the disk, obtained from vertical load on the flange and interference fit of 0.25 mm, with experimental data**

Номер точки	Экспериментальное значение напряжения, $\sigma_э$, МПа	Расчетное значение напряжения, $\sigma_т$, МПа	Относительное отклонение, $\Delta = \frac{\lvert\sigma_э - \sigma_т\rvert}{\sigma_э} 100\ \%$
1	–472	–471	0,2
2	–802	–804	–0,2
3	345	285	17,4
4	–11	–11,2	–1,8
5	–318	–280	11,9
6	375	373	0,5
7	–250	–228	8,8
8	30,4	22,6	25,7

Таблица 2

Результаты сравнения расчетных значений радиальных напряжений в диске, полученных от вертикальной нагрузки на гребень и натяга 0,4 мм, с экспериментальными данными

Table 2. **Results of comparing the calculated values of radial stresses in the disk, obtained from vertical load on the flange and interference fit of 0.4 mm, with experimental data**

Номер точки	Экспериментальное значение напряжения, $\sigma_э$, МПа	Расчетное значение напряжения, $\sigma_т$, МПа	Относительное отклонение, $\Delta = \frac{\lvert\sigma_э - \sigma_т\rvert}{\sigma_э} 100\ \%$
1	–472	–483	–2,3
2	–802	–820	–2,2
3	345	296	14,2
4	–11	–12,2	–10,9
5	–318	–334	–5,0
6	375	386	–2,9
7	–250	–256	–2,4
8	30,4	34,3	–12,8

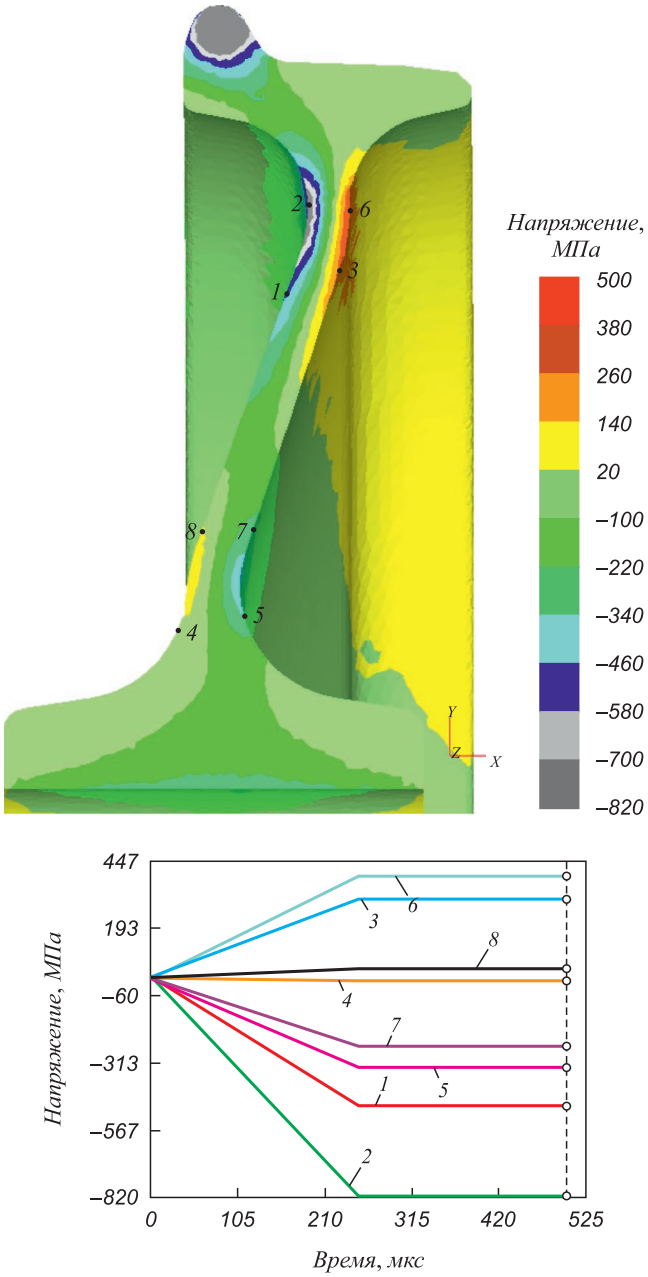


Рис. 3. Результаты расчета радиальных напряжений в диске стандартного колеса, полученных от вертикальной нагрузки на гребень и натяга 0,4 мм, МПа:
1 – –483; *2* – –820; *3* – 296; *4* – –12,2; *5* – –334; *6* – 386; *7* – –256; *8* – 34,3

Fig. 3. Results of calculating the radial stresses in the disk of standard wheel, obtained from vertical load on the flange and interference fit of 0.4 mm, MPa:
1 – –483; *2* – –820; *3* – 296; *4* – –12.2; *5* – –334; *6* – 386; *7* – –256; *8* – 34.3

дание натяга 0,4 мм на диаметр (т. е. на 60 % больше требуемого) обеспечивает получение хорошего соответствия расчетных и экспериментальных значений напряжений не только на качественном, но и количественном уровне (рис. 3, табл. 2). Причем, как показывает сравнительный анализ табл. 1 и 2, в этом случае имеет место верхняя оценка напряжений в опасных зонах диска, что, безусловно, является положительным моментом.

Таким образом, задание при моделировании большего натяга между ступицей и осью позволяет получить в колесе дополнительные напряжения, которые с достаточной степенью точности отражают влияние остаточных технологических напряжений на НДС диска колеса.

Выводы

Разработан метод учета остаточных технологических напряжений при моделировании напряженно-деформированного состояния дисков железнодорожных колес. Сущность метода заключается в задании при расчете величины натяга между ступицей и осью больше фактической. Это позволяет получить в колесе дополнительные напряжения, которые с достаточной степенью точности отражают влияние остаточных технологических напряжений на НДС диска колеса.

На примере расчета НДС колеса с плоскоконическим диском (ГОСТ 10791 – 2011) показано, что увеличение величины натяга между ступицей и осью на 60 % (с 0,25 до 0,4 мм на диаметр) позволяет адекватно спрогнозировать величины напряжений в наиболее нагруженных при эксплуатации зонах диска. Максимальные относительные отклонения расчетных значений радиальных напряжений от экспериментальных и по наружной, и по внутренней сторонам колеса не превышают 14 %.

Практическая реализация предлагаемого метода достаточно проста и не требует проведения широкомасштабных теоретических и экспериментальных исследований. При этом метод обеспечивает повышение точности прогноза прочностных характеристик колес, а также универсальность подхода – возможность использования для различных типоразмеров колес.

Список литературы / References

1. Liu Yo., Stratman B., Mahadevan S. Fatigue crack initiation life prediction of railroad wheels // International Journal of Fatigue. 2006. Vol. 28. No. 7. P. 747–756. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.09.007
2. Oliver J., Lonsdale C. North American railways combat split wheel rims // International Railway Journal. 2014. Vol. 54. No. 5. P. 31–34.
3. Haidaria A., Tehrani P.-H. Thermal load effects on fatigue life of a cracked railway wheel // Latin American Journal of Solids and Structures. 2015. Vol. 12. No. 6. P. 1144–1157. https://doi.org/10.1590/1679-78251658
4. Okagata Yo. Design technologies for railway wheels and future prospects // Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report. 2013. No. 105. P. 26–33.
5. Bernasconi A., Filippini M., Foletti S., Vaudo D. Multiaxial fatigue of a railway wheel steel under non-proportional loading // International Journal of Fatigue. 2006. Vol. 28. No. 5–6. P. 663–672. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.07.045
6. Masoudi Nejad R., Farhangdoost K., Shariati M. Numerical study on fatigue crack growth in railway wheels under the influence of residual stresses // Engineering Failure Analysis. 2015. Vol. 52. P. 75–89. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.03.002
7. Arslan M.A., Kayabasi O. 3-D Rail–Wheel contact analysis using FEA // Advances in Engineering Software. 2012. Vol. 45. No. 1. P. 325–331. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.10.009
8. Mohan P.M. Analysis of railway wheel to study thermal and structural behaviour // International Journal of Scientific & Engineering Research. 2012. Vol. 3. No. 11. P. 1–4.
9. Makino T., Kato T., Hirakawa K. The effect of slip ratio on the rolling contact fatigue property of railway wheel steel // International Journal of Fatigue. 2012. Vol. 36. No. 1. P. 68–79. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.08.014
10. Zhang M.R., Gu H.C. Fracture toughness of nanostructured railway wheels // Engineering Fracture Mechanics. 2008. Vol. 75. No. 18. P. 5113–5121. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.07.007
11. Keropyan A., Gorbatyuk S., Gerasimova A. Tribotechnical aspects of wheel-rail system interaction // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 564–569. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.517
12. Кононов Д.П., Шадрина Н.Ю. Повышение безопасности движения железнодорожного транспорта за счет увеличения усталостной прочности цельнокатаных колес // Бюллетень результатов научных исследований. 2014. Вып. 1(10). С. 6–10.
13. Якушев А.В., Кононов Д.П., Комиченко С.О. Результаты определения остаточных технологических напряжений в дисковой части цельнокатаных колес грузовых и пассажирских вагонов методом тензометрии // Транспорт Российской Федерации. 2015. № 3(58). С. 66–68.
14. Seo J.W., Kwon S.J., Jun H.K., Lee D.H. Effects of residual stress and shape of web plate on the fatigue life of railway wheels // Engineering Failure Analysis. 2009. Vol. 16. No. 7. P. 2493–2507. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.04.013
15. Sitarz M., Sładkowski A., Bizon K., Chruzik K. Designing of railway wheels. Part 1: Finite element method // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2005. Vol. 219. No. 2. P. 91–110. https://doi.org/10.1243/095440905X8826
16. Sitarz M., Sładkowski A., Bizon K., Chruzik K. Designing of railway wheels. Part 2: Comparison of numerical analysis and experimental research // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of rail and rapid transit. 2005. Vol. 219. No. 2. P. 111–120. https://doi.org/10.1243/095440905X8817
17. Kiriyama K., Okagata Y., Kato T. A study on the fatigue properties of the plate area of Japanese railway wheels // 16th Int. Wheelset Congress. 2010. 12 p.
18. Atai A.A., Azarlu E. Multi-objective optimization of web profile of rail-way wheel using Bi-directional evolutionary structural op-

1. Liu Yo., Stratman B., Mahadevan S. Fatigue crack initiation life prediction of railroad wheels. *International Journal of Fatigue*. 2006, vol. 28, no. 7, pp. 747–756. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.09.007
2. Oliver J., Lonsdale C. North American railways combat split wheel rims. *International Railway Journal*. 2014, vol. 54, no. 5, pp. 31–34.
3. Haidaria A., Tehrani P.-H. Thermal load effects on fatigue life of a cracked railway wheel. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 2015, vol. 12, no. 6, pp. 1144–1157. https://doi.org/10.1590/1679-78251658
4. Okagata Yo. Design technologies for railway wheels and future prospects. *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*. 2013, no. 105, pp. 26–33.
5. Bernasconi A., Filippini M., Foletti S., Vaudo D. Multiaxial fatigue of a railway wheel steel under non-proportional loading. *International Journal of Fatigue*. 2006, vol. 28, no. 5–6, pp. 663–672. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.07.045
6. Masoudi Nejad R., Farhangdoost K., Shariati M. Numerical study on fatigue crack growth in railway wheels under the influence of residual stresses. *Engineering Failure Analysis*. 2015, vol. 52, pp. 75–89. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.03.002
7. Arslan M.A., Kayabasi O. 3-D Rail–Wheel contact analysis using FEA. *Advances in Engineering Software*. 2012, vol. 45, no. 1, pp. 325–331. https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.10.009
8. Mohan P.M. Analysis of railway wheel to study thermal and structural behavior. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2012, vol. 3, no. 11, pp. 1–4.
9. Makino T., Kato T., Hirakawa K. The effect of slip ratio on the rolling contact fatigue property of railway wheel steel. *International Journal of Fatigue*. 2012, vol. 36, no. 1, pp. 68–79. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2011.08.014
10. Zhang M.R., Gu H.C. Fracture toughness of nanostructured railway wheels. *Engineering Fracture Mechanics*. 2008, vol. 75, no. 18, pp. 5113–5121. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.07.007
11. Keropyan A., Gorbatyuk S., Gerasimova A. Tribotechnical aspects of wheel-rail system interaction. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 206, pp. 564–569. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.517
12. Kononov D.P., Shadrina N.Yu. Improving the safety of railway transport by increasing the fatigue strength of solid-rolled wheels. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovanii*. 2014, no. 1(10), pp. 6–10. (In Russ.).
13. Yakushev A.V., Kononov D.P., Komichenko S.O. Determination of residual technological stresses in the disk part of solid-rolled wheels of freight and passenger cars by tensometric method. *Transport Rossiiskoi Federatsii*. 2015, no. 3(58), pp. 66–68. (In Russ.).
14. Seo J.W., Kwon S.J., Jun H.K., Lee D.H. Effects of residual stress and shape of web plate on the fatigue life of railway wheels. *Engineering Failure Analysis*. 2009, vol. 16, no. 7, pp. 2493–2507. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.04.013
15. Sitarz M., Sładkowski A., Bizon K., Chruzik K. Designing of railway wheels. Part 1: Finite element method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2005, vol. 219, no. 2, pp. 91–110. https://doi.org/10.1243/095440905X8826
16. Sitarz M., Sładkowski A., Bizon K., Chruzik K. Designing of railway wheels. Part 2: Comparison of numerical analysis and experimental research. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part F: Journal of rail and rapid transit*. 2005, vol. 219, no. 2, pp. 111–120. https://doi.org/10.1243/095440905X8817
17. Kiriyama K., Okagata Y., Kato T. A study on the fatigue properties of the plate area of Japanese railway wheels. *16th Int. Wheelset Congress*. 2010, 12 p.
18. Atai A.A., Azarlu E. Multi-objective optimization of web profile of rail-way wheel using Bi-directional evolutionary structural optimi-

timization // Journal of Computational Applied Mechanics. 2017. Vol. 48. No. 2. P. 307–318. https://doi.org/10.22059/JCAMECH.2017.237353.160

19. Яковченко А.В., Снитко С.А. Анализ и совершенствование конструкций колес, удовлетворяющих ГОСТ 10791–2011 // Сталь. 2015. № 12. С. 32–38.
20. Пашолок И.Л., Цюренко В.Н., Разумов А.С. Разработка критериев работоспособности дисков цельнокатаных колес для грузовых вагонов нового поколения // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2002. № 3. С. 19–23.
21. Керенцев Д.Е., Пономарев Ю.К. Влияние остаточных технологических напряжений и тепловых эксплуатационных нагрузок на прочность железнодорожных колес // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2015. Т. 14. № 3. Ч. 2. С. 336–344.
22. Сухов А.В., Разумов А.С., Базанов Ю.А., Шиткин С.Л., Гринштон А.С., Яндимиров А.А. Исследование напряжений в цельнокатаных вагонных колесах повышенной твердости с различной геометрией диска // Металлург. 2007. № 12. С. 56–60.
23. Цвик Л.Б., Запольский Д.В., Зеньков Е.В., Еремеев В.К. Сравнительный анализ деформирования дисковой части цельнокатаных железнодорожных колес различного конструктивного оформления // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2013. № 4. С. 29–6.
24. Волохов Г.М., Керенцев Д.Е. Развитие методов оценки прочности конструкций цельнокатаных железнодорожных колес и критериев их допуска к эксплуатации // Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения. 2013. Т. 2(66). С. 138–154.
25. Керенцев Д.Е. Расчетно-экспериментальная оценка остаточных технологических напряжений в цельнокатаных колесах // Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ: Сборник тезисов III научно-технического семинара, 6–7 апреля 2016 г., Брянск. Брянск: БГТУ, 2016. С. 32–34.
26. Huang X., Wang X., Shen X., Xiao F. Effect of the shape of railway wheel plate on its stresses and fatigue evaluation // Engineering Failure Analysis. 2019. Vol. 97. P. 718–726. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.063
27. Срок службы железнодорожных колес // Железные дороги мира. 2003. № 7. С. 48–58.
28. Кушнарев А.В., Киричков А.А., Копцева Н.В., Чукин Д.М., Барышников М.П. Структурно-фазовые превращения при непрерывном охлаждении сталей для цельнокатаных железнодорожных колес / Сталь. 2014. № 4. С. 78–83.
29. Lingamanaik S.N., Chen B.K. Thermo-mechanical modelling of residual stresses induced by martensitic phase transformation and cooling during quenching of railway wheels // Journal of Materials Processing Technology. 2011. Vol. 211. No. 9. P. 1547–1552. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.04.007
30. Максимов Е.А., Шаталов Р.Л. Исследование параметров горячей правки толстых стальных листов на роликовой правильной машине // Металлург. 2018. № 2. С. 42–45.
31. А. с. 1497242 СССР. Способ изготовления цельнокатаных железнодорожных колес / И.Г. Узлов, А.Ф. Гринев, Н.Г. Мирошниченко и др.; заявл. 11.12.1987; опубл. 30.07.89. Бюл. № 28.
32. Керенцев Д.Е. Повышение конструкционной прочности железнодорожных колес подвижного состава: Дисс. … канд. техн. наук. Самара, 2016. 173 с.
33. ГОСТ 10791 – 2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия.
34. ГОСТ 33783 – 2016. Колесные пары железнодорожного подвижного состава. Методы определения показателей прочности.

zation. *Journal of Computational Applied Mechanics*. 2017, vol. 48, no. 2, pp. 307–318. https://doi.org/10.22059/JCAMECH.2017.237353.160

19. Yakovchenko A.V., Snitko S.A. Railroad wheels satisfying state standard GOST 10791–2011. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 12, pp. 967–974. https://doi.org/10.3103/S0967091215120153
20. Pasholok I.L., Tsyurenko V.N., Razumov A.S. Development of performance criteria of solid-rolled wheels for new generation freight cars. *Vestnik VNIIZhT*. 2002, no. 3, pp. 19–23. (In Russ.).
21. Kerentsev D.E., Ponomarev Yu.K. Influence of residual technological stresses and thermal operating loads on the strength of railway wheels. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*. 2015, vol. 14, no. 3, part 2, pp. 336–344. (In Russ.).
22. Sukhov A.V., Razumov A.S., Bazanov Yu.A., Shitkin S.L., Grinshpon A.S., Yandimirov A.A. Study of stresses in hard rolled railcar wheels with a web of different geometry. *Metallurgist*. 2007, vol. 51, no. 11–12, pp. 670–676. https://doi.org/10.1007/s11015-007-0121-2
23. Tsvik L.B., Zapol'skii D.V., Zen'kov E.V., Eremeev V.K. Comparative analysis of deformation of disk part of solid-rolled railway wheels with various designs. *Vestnik VNIIZhT*. 2013, no. 4, pp. 29–36. (In Russ.).
24. Volokhov G.M., Kerentsev D.E. Development of methods for assessing the strength of structures of solid-rolled railway wheels and criteria for their admission to operation. *Vestnik VElNII*. 2013, vol. 2(66). pp. 138–154. (In Russ.).
25. Kerentsev D.E. Calculated and experimental assessment of residual technological stresses in solid-rolled wheels. In: *Computer Modeling in Railway Transport: Dynamics, Strength, Wear: Coll. of Theses of III Sci. and Tech. Seminar on April 6–7, 2016, Bryansk*. Bryansk: BSTU, 2016, pp. 32–34. (In Russ.).
26. Huang X., Wang X., Shen X., Xiao F. Effect of the shape of railway wheel plate on its stresses and fatigue evaluation. *Engineering Failure Analysis*. 2019, vol. 97, pp. 718–726. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.01.063
27. Service life of railway wheels. *Zheleznye dorogi mira*. 2003, no. 7, pp. 48–58. (In Russ.).
28. Kushnarev A.V., Kirichkov A.A., Koptseva N.V., Chukin D.M., Baryshnikov M.P. Structural and phase transformations in the continuous cooling of steel for one-piece railroad wheels. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 4, pp. 306–311. https://doi.org/10.3103/S0967091214040123
29. Lingamanaik S.N., Chen B.K. Thermo-mechanical modelling of residual stresses induced by martensitic phase transformation and cooling during quenching of railway wheels. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, vol. 211, no. 9, pp. 1547–1552. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.04.007
30. Maksimov E.A., Shatalov R.L. A study of the parameters for hot straightening of thick steel plates on a roller straightening machine. *Metallurgist*. 2018, vol. 62, no. 1–2, pp. 132–137. https://doi.org/10.1007/s11015-018-0635-9
31. Uzlov I.G., Grinev A.F., Miroshnichenko N.G., etc. Method of production of solid-rolled railway wheels. Certificate of authorship USSR no. 1497242. MPK C21 D 9/34. *Bulleten' izobretenii*. 1989, no. 28. (In Russ.).
32. Kerentsev D.E. *Increasing the structural strength of railway rolling stock wheels: Cand. Tech. Sci. Diss*. Samara: 2016, 173 p. (In Russ.).
33. *GOST 10791 – 2011. Solid-rolled wheels. Technical requirements*. (In Russ.).
34. *GOST 33783 – 2016. Wheelsets of railway rolling stock. Methods for determining strength indicators*. (In Russ.).

Сведения об авторах / Information about the authors

Сергей Александрович Снитко, *д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением»,* Донецкий национальный технический университет
ORCID: 0000-0002-1099-5801
E-mail: snitko_sa@mail.ru

Александр Васильевич Яковченко, *д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением»,* Донецкий национальный технический университет
ORCID: 0000-0002-1099-5801
E-mail: mond1991@mail.ru

Сергей Михайлович Горбатюк, *д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Инжиниринг технологического оборудования»,* Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
ORCID: 0000-0002-4368-5965
E-mail: sgor02@mail.ru

Sergei A. Snitko, *Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair "Metal Forming",* Donetsk National Technical University
ORCID: 0000-0002-1099-5801
E-mail: snitko_sa@mail.ru

Aleksandr V. Yakovchenko, *Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair "Metal Forming",* Donetsk National Technical University
ORCID: 0000-0002-1099-5801
E-mail: mond1991@mail.ru

Sergei M. Gorbatyuk, *Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair "Engineering of Technological Equipment",* National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS)
ORCID: 0000-0002-4368-5965
E-mail: sgor02@mail.ru

Поступила в редакцию 03.03.2021
После доработки 04.03.2021
Принята к публикации 16.04.2021

Received 03.03.2021
Revised 04.03.2021
Accepted 16.04.2021

Оригинальная статья
УДК 669.18:620.192
DOI 10.17073/0368-0797-2021-5-345-352

Оптимизация технологии производства непрерывнолитой заготовки рельсовой стали с целью повышения чистоты по неметаллическим включениям

А. М. Григорьев [1], М. С. Кузнецов [2], Д. С. Шепелев [2], Е. М. Алексеев [2], К. В. Григорович [1, 3]

[1] **Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»** (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)
[2] **АО «Уральская Сталь»** (Россия, 462353, Оренбургская обл., Новотроицк, ул. Заводская, 1)
[3] **Институт металлургии и материаловедения им А.А. Байкова РАН** (Россия, 119991, Москва, Ленинский пр., 49)

Аннотация. Целью данного исследования являлось изучение причин образования недеформируемых неметаллических включений в рельсовой стали и пути снижения отбраковки готовых рельсов по дефектам ультразвукового контроля. Исследования проводили в условиях электросталеплавильного цеха АО «Уральская Сталь». В центральной заводской лаборатории комбината был проведен химический анализ неметаллических включений в образцах готовых рельсов, отбракованных на установке ультразвукового контроля при производстве рельсов ТОО «Актюбинский рельсобалочный завод» из заготовки производства АО «Уральская Сталь». По своему составу неметаллические включения представлены оксидами алюминия. Определены наиболее вероятные причины получения неметаллических включений: в результате использования ферросплавов, содержащих в своем составе алюминий, или взаимодействия компонентов расплава с огнеупорными материалами и шлакообразующей смеси. Проведен анализ ферросплавов, применяемых при производстве рельсовой стали. Произведено промышленное опробование технологии производства непрерывнолитой заготовки рельсовой стали с заменой ферросилиция марки ФС65, имеющего в своем составе алюминий, на карбид кремния. Отмечено повышение степени усвоения кремния и углерода на опытных плавках. Оценка загрязненности неметаллическими включениями и оценка механических свойств рельсовой стали, полученной по опытной технологии, показали, что служебные характеристики металла рельсовой стали соответствуют требованиям ГОСТ Р 51685-2013. Промышленным экспериментом подтверждено, что технология легирования карбидом кремния рельсовой стали Э76Ф в условиях АО «Уральская Сталь» технически возможна. На опытной партии металла получено увеличение выхода годных 100-метровых рельсов на 17 %, произведенных из непрерывнолитой заготовки АО «Уральская Сталь».

Ключевые слова: производство стали, рельсовая сталь, ферросплавы, раскисление, неметаллические включения

Для цитирования: Григорьев А.М., Кузнецов М.С., Шепелев Д.С., Алексеев Е.М., Григорович К.В. Оптимизация технологии производства непрерывнолитой заготовки рельсовой стали с целью повышения чистоты по неметаллическим включениям // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 345–352. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-345-352

Original article

Optimization of production technology of continuous cast rail steel for increasing its purity by non-metallic inclusions

A. M. Grigor'ev [1], M. S. Kuznetsov [2], D. S. Shepelev [2], E. M. Alekseev [2], K. V. Grigorovich [1, 3]

[1] **National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS)** (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)
[2] **JSC "Ural Steel"** (1 Zavodskaya Str., Novotroitsk, Orenburg Region 462356, Russian Federation)
[3] **Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences** (49 Leninskii Ave., Moscow 119991, Russian Federation)

Abstract. The purpose of the work was to examine the reasons for formation of non-deformable non-metallic inclusions in rail steel and ways to reduce the rejection of finished rails due to the defects revealed during ultrasonic testing. The study was conducted at the steelmaking plant of JSC "Ural Steel". In the central laboratory of the combine, a chemical analysis of non-metallic inclusions was carried out in the samples of finished rails produced from blanks manufactured by JSC "Ural Steel" and rejected at the ultrasonic test unit during the rail production at the "Aktobe Rail and Section Works" LLP. Non-metallic inclusions by their composition are represented by aluminium oxides. The most probable reasons for their formation have been determined as following: the use of aluminium containing ferroalloys and interaction of the melt components with refractory materials and casting

powder. The authors made analysis of the ferroalloys used in production of rail steel. Industrial trials of the manufacturing process of continuously cast blanks from rail steel were carried out, where FS65 ferrosilicon, which contains aluminium, was replaced with silicon carbide. An increasing degree of silicon and carbon recovery in trial heats was noted. Evaluation of contamination with non-metallic inclusions and mechanical properties of the rail steel manufactured using the experimental technology showed that the service characteristics of the rail steel meet requirements of the state standard GOST R 51685 – 2013. The full-scale experiment has confirmed that the technology of alloying E76F rail steel with silicon carbide at JSC "Ural Steel" is technically feasible. The yield of 100-meter rails was increased by 17 % on a trial batch produced from JSC "Ural Steel" continuously cast blanks.

Keywords: steel production, rail steel, ferroalloys, deoxidation, non-metallic inclusions

For citation: Grigor'ev A.M., Kuznetsov M.S., Shepelev D.S., Alekseev E.M., Grigorovich K.V. Optimization of production technology of continuous cast rail steel for increasing its purity by non-metallic inclusions. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 5, pp. 345–352. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-345-352

Введение

Железнодорожный транспорт России – одна из важнейших базовых отраслей экономики. Данный вид транспорта является универсальным, так как способен перевозить практически все виды грузов.

С каждым годом сложность и динамичность железнодорожной транспортной системы возрастают за счет увеличения транспортных потоков. Ведущее значение железнодорожного транспорта обусловлено двумя факторами: технико-экономическими преимуществами над многими другими видами транспорта и совпадением направления основных транспортно-экономических связей России [1 – 3].

С развитием высокоскоростных железных дорог предъявляются гораздо более высокие требования к комплексным свойствам железнодорожных рельсов. Поскольку аварии на железнодорожных дорогах угрожают безопасности перевозок, следовательно, все большее внимание уделяется качеству рельсовой стали.

Приоритетным направлением развития металлургической отрасли является получение стабильных служебных характеристик металлопродукции при сокращении материальных и энергетических затрат на производство.

Известно, что для потребителя одной из важнейших характеристик является эксплуатационная стойкость рельсов. Анализ железнодорожных рельсов разных компаний-производителей, проведенный в работах [4 – 11], показал различную эксплуатационную стойкость при испытаниях на экспериментальном кольце АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта». Установлено, что небольшие изменения макро- и микроструктуры и химического состава стали незначительно влияют на эксплуатационную стойкость рельсов. Основное влияние на эксплуатационную стойкость оказывает чистота стали по неметаллическим включениям [12 – 15].

Целью данного исследования являлось изучение причин образования неметаллических включений в рельсовой стали и пути снижения отбраковки готовых рельсов по дефектам ультразвукового контроля (УЗК).

Материалы и методика исследования

В 2017 г. после модернизации блюмовой четырехручьевой машины непрерывного литья заготовки (МНЛЗ) № 1 в электросталеплавильном цехе (ЭСПЦ) АО «Уральская Сталь» началось освоение технологии производства непрерывнолитой заготовки для производства железнодорожных рельсов.

Выплавку полупродукта производят в электродуговой сталеплавильной печи (ДСП), оснащенной трансформатором мощностью 95 МВА. В качестве шихты используют жидкий чугун и металлолом. Химический состав рельсовой стали Э76Ф представлен в табл. 1.

На установке ковш-печь (УКП) и установке вакуумирования стали (УВС) камерного типа производят внепечную обработку стали. Непрерывную разливку осуществляют на МНЛЗ № 1 с получением блюмовой заготовки сечением 300×330 мм для дальнейшего производства железнодорожных рельсов на ТОО «Актюбинский рельсобалочный завод» (АРБЗ).

Выход годных 100-метровых рельсов на этапе освоения производства из непрерывнолитой заготовки АО «Уральская Сталь» помесячно составлял от 33 до 80 %.

Результаты металлографического исследования

В центральной лаборатории АО «Уральская Сталь» проведен химический анализ неметаллических вклю-

Таблица 1

Химический состав рельсовой стали Э76Ф

Table 1. **Chemical composition of E76F rail steel**

Массовая доля элементов, %							
C	Mn	Si	V	Cr	P	S	Al
0,71 – 0,82	0,75 – 1,25	0,25 – 0,60	0,03 – 0,15	<0,200	<0,020	<0,020	<0,004

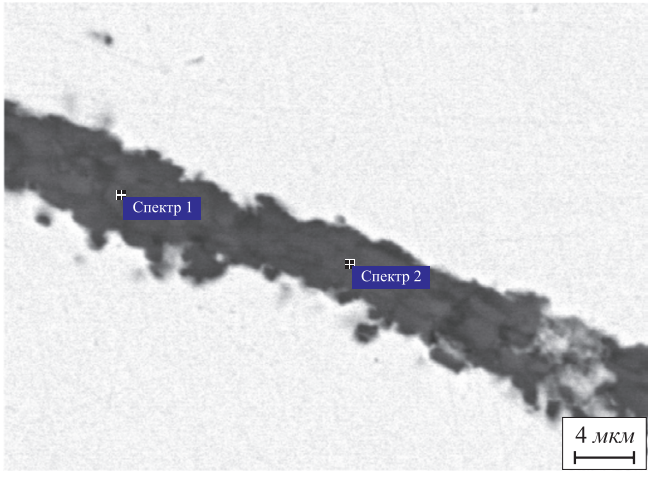
чений в образцах готовых рельсов, отбракованных по дефектам УЗК при производстве рельсов из заготовки АО «Уральская Сталь» на ТОО «АРБЗ».

Анализ проводился с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6490LV с системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 250. Данный метод исследования является относительным и применяется только для определения концентрации основных элементов материала. Предел обнаружения элементов в зависимости от атомного номера составляет 0,1 – 0,5 % (рис. 1).

В результате проведенного металлографического анализа было показано, что дефекты в образце, вырезанном из рельса, представляют собой расслоения по неметаллическим включениям, максимальная протяженность которых составляет 4,0 мм. По своему составу неметаллические включения представлены оксидами алюминия, но также присутствуют оксиды кальция, кремния и магния. Наиболее вероятными причинами получения неметаллических включений является использование ферросплавов, содержащих в своем составе алюминий, или результат взаимодействия компонентов расплава с огнеупорными материалами.

Результаты исследования и их обсуждение

Технология производства рельсовой непрерывнолитой заготовки в ЭСПЦ АО «Уральская Сталь» предполагает использование для легирования стали ферросилиция марки FeSi65, ферромарганца марки FeMn78 и ферросиликомарганца марки FeMnSi17 (табл. 2).



Спектр	Содержание химических элементов, %					
	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe
1	44,09	0,48	48,68	1,70	1,99	2,14
2	42,42	0,60	44,85	2,67	5,72	3,16

Рис. 1. Неметаллические включения в рельсе

Fig. 1. Nonmetallic inclusions in a rail

Таблица 2

Химический состав ферросплавов

Table 2. **Chemical composition of the ferroalloys**

Ферросплав	Массовая доля элементов в ферросплаве, %					
	Si	Mn	C	Al	S	P
FeSi65	63 – 68	–	≤0,1	≤1,3	≤0,2	≤0,05
FeMn78	≤6	75 – 82	≤7,0	–	≤0,2	≤0,05
FeMnSi17	15 – 20	≥65	≤3,5	–	≤0,2	≤0,06

Из данных табл. 2 следует, что в ферросилиции марки FeSi65 содержится примерно до 1,3 % Al. Средний расход на плавку составляет 10,5 кг/т.

В работе [16] рассмотрен результат применения при производстве стали ферросилиция различных марок с содержанием алюминия 1,34, 1,4 и 0,04 %. Отмечено, что применение ферросилиция с высоким содержанием алюминия, в отличии особо чистого ферросилиция, ведет к увеличению количества образовавшихся включений Al_2O_3.

Согласно средним фактическим данным содержания алюминия в ферросилиции, применяемом для производства рельсовой стали, произведем расчет возможного прироста алюминия в металле.

Уравнение расхода ферросплавов:

$$G_{\text{фс}} = \frac{G_{Me}\left([E]_{\text{кк}} - [E]_{\text{нк}}\right)}{[E]_{\text{фс}} U_{\text{усв}}} 100, \qquad (1)$$

где $G_{\text{фс}}$ – масса вводимого ферросплава, кг; G_{Me} – масса металла, кг; $[E]_{\text{кк}}$ – содержание элемента в металле после ввода ферросплава, %; $[E]_{\text{нк}}$ – содержание элемента в металле до ввода ферросплава, %; $[E]_{\text{фс}}$ – содержание элемента в ферросплаве, %; $U_{\text{усв}}$ – коэффициент усвоения элемента.

Для расчета принимаем коэффициент усвоения алюминия в рассматриваемых ферросплавах 90 % и содержание элемента в металле до ввода ферросплава 0 %. В табл. 3 представлена расчетная информация.

Из расчета следует, что в фактических условиях прирост алюминия в металле от применения ферроси-

Таблица 3

Расчет прироста алюминия из ферросилиция

Table 3. **Calculation of the gain of aluminum from ferrosilicon**

Ферро-сплав	Содержание алюминия в ферро-сплаве, %	Средний расход ферро-силиция на плавку, кг/т	Коэффи-циент усвоения алюминия, %	Расчет прироста [Al], %
FeSi65	1,3	10,5	90	0,0123

лиция марки FeSi65, в котором содержится примерно 1,3 % Al, составляет 0,0123 % (по массе), что существенно превышает требования ГОСТ Р51685-2013.

Термодинамические условия образования неметаллических включений на основе алюминия

Произведен термодинамический расчет образования неметаллических включений на основе оксидов алюминия (Al_2O_3) в рельсовой стали при температуре 1873 К. Рассматриваемая система: [O], T и [Al]. Независимыми переменными являются температура T и содержание алюминия в металлическом расплаве [Al]:

$$2[\text{Al}] + 3[\text{O}] = \text{Al}_2\text{O}_3(\text{тв}); \quad (2)$$

$$K_{\text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{a_{\text{Al}}^2 a_{\text{O}}^3} = \frac{1}{[\text{Al}]^2 f_{\text{Al}}^2 [\text{O}]^3 f_{\text{O}}^3}. \quad (3)$$

Прологарифмировав уравнение и учитывая, что $\lg K_{\text{Al}_2\text{O}_3} = \frac{-\Delta G^{\circ}_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{2,3RT}$, получим:

$$\frac{\Delta G^{\circ}_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{2,3RT} = 2\lg[\text{Al}] + 2\lg f_{\text{Al}} + 3\lg[\text{O}] + 3\lg f_{\text{O}}. \quad (4)$$

Значение $\Delta G^{\circ}_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ можно получить алгебраическим сложением следующих уравнений:

$$2\text{Al}(\text{ж}) + \frac{3}{2}\text{O}_2(\text{г}) = \text{Al}_2\text{O}_3(\text{тв});$$

$$\Delta G^{\circ}_{\text{Al}_2\text{O}_3} = -1\,687\,908 + 325,15T, \text{ Дж/моль}; \quad (5)$$

$$\text{Al}(\text{ж}) = [\text{Al}]_{1\,\%};$$

$$\Delta G^{\circ}_{[\text{Al}]_{1\,\%}} = -71\,100 - 19,4T, \text{ Дж/моль}; \quad (6)$$

$$\frac{1}{2}\text{O}_2(\text{г}) = [\text{O}]_{1\,\%};$$

$$\Delta G^{\circ}_{[\text{O}]_{1\,\%}} = -117\,110 - 3,39T, \text{ Дж/моль}; \quad (7)$$

$$2[\text{Al}]_{1\,\%} + 3[\text{O}]_{1\,\%} = \text{Al}_2\text{O}_3(\text{тв});$$

$$\Delta G^{\circ} = \Delta G^{\circ}_{\text{Al}_2\text{O}_3} - 2\Delta G^{\circ}_{[\text{Al}]_{1\,\%}} - 3\Delta G^{\circ}_{[\text{O}]_{1\,\%}}.$$

Используя температурные зависимости и данные работ [17 – 21], рассчитывали значения коэффициентов активности $\lg f_i = \sum_j [j] e_i^j$.

Общее уравнение, связывающее рассматриваемые переменные и термодинамические условия образования оксида алюминия в расплаве, представлено ниже:

$$\frac{-1\,194\,378 + 374,12T}{2,3RT} = 2\lg[\text{Al}] + 2\sum_{\text{Al}}[j]e_{\text{Al}}^j + 3\lg[\text{O}] + 3\sum_{\text{O}}[j]e_{\text{O}}^j. \quad (8)$$

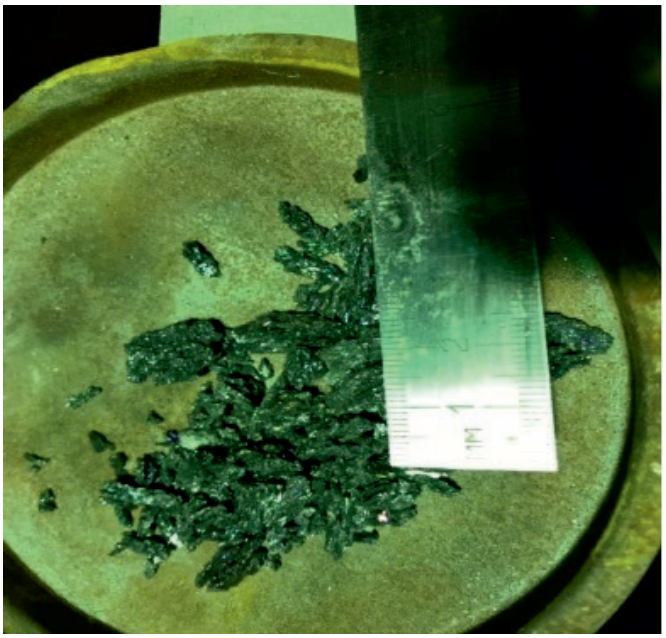
Результаты расчетов показывают, что оксид алюминия в рельсовой стали при температуре 1873 К образуется при концентрации алюминия $[\text{Al}]_{\min} = 0,0017$ % (по массе).

С целью улучшения технологии выплавки, внепечной обработки и разливки рельсовой стали Э76Ф были проведены серии опытных плавок, где легирование металла до требуемого ГОСТ Р 51685-2013 содержания кремния в стали осуществляли с применениям карбида кремния (рис. 2).

Производство непрерывнолитой заготовки рельсовой стали Э76Ф по опытной и сравнительной технологии выполняли в соответствии с требованиями действующей нормативной документации.

Раскисление стали опытных плавок производили отдачей коксовой мелочи и карбида кремния (порядка 600 кг) на выпуске металла из ДСП в сталеразливочный ковш. Далее на УКП проводили отдачу карбида кремния (около 550 кг). По опытной технологии произведено девять плавок рельсовой стали Э76Ф с применением карбида кремния. В табл. 4 представлена информация по расходу материалов.

В качестве сравнительного металла проведены плавки стали Э76Ф по стандартной технологии с использованием ферросилиция марки FeSi65. Отдача ферросилиция на сравнительных плавках производилась в сталеразливочный ковш во время выпуска металла из ДСП и на УКП.



Массовая доля элементов в материале, %				
Si	C	Al	S	P
62 – 67	22 – 31	–	–	–

Рис. 2. Карбид кремния

Fig. 2. Silicon carbide

Применение карбида кремния показало следующие результаты [2].

• Выход годных 100-метровых рельсов из непрерывнолитой заготовки АО «Уральская Сталь» увеличился на 17 %.

• Усвоение кремния на массу годного металла:
– на сравнительных плавках 53,5 %;
– на опытных плавках 59,7 %.

• Усвоение углерода на массу годного металла:
– на сравнительных плавках 52,5 %;
– на опытных плавках 73,7 %.

• Результаты по оценке неметаллических включений на опытном металле соответствуют требованиям ГОСТ Р 51685 – 2013 (табл. 5).

Результаты по оценке механических свойств металла рельсовой стали Э76Ф соответствуют требованиям ГОСТ Р 51685 – 2013 (табл. 6).

Оценка загрязненности неметаллическими включениями и механических свойств стали, полученной по опытной технологии, показала, что служебные характеристики металла рельсовой стали соответствуют требованиям ГОСТ Р 51685 – 2013.

Результаты металлографического исследования образцов рельсов, произведенных по опытной технологии

В центральной лаборатории АО «Уральская Сталь» проведен химический анализ неметаллических включений в образцах готовых рельсов, отбракованных на установке УЗК при производстве рельсов на ТОО «АРБЗ» из заготовки АО «Уральская Сталь».

Анализ проведен с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6490LV в комплекте с системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 250 (рис. 3).

Химический состав неметаллических включений

В результате проведенного металлографического анализа следует, что дефекты в образце от рельса представляют собой расслоения по неметаллическим включениям максимальной протяженностью 2,1 мм. По своему составу неметаллические включения являются «сложными» и состоят из оксидов алюминия и кремния, но также включают оксиды кальция, калия, натрия, магния и других элементов. Наличие в неметал-

Таблица 4

Расход ферросплавов при производстве стали Э76Ф

Table 4. **Ferroalloy consumption in production of E76F steel**

Технология	Число плавок	Расход ферросплавов на годный металл, кг/т	
		ферросилиций	карбид кремния
Сравнительная	6	10,5	–
Опытная	9	–	13,8

Таблица 5

Результаты оценки неметаллических включений рельсовой стали Э76Ф

Table 5. **Assessment results of nonmetallic inclusions in E76F rail steel**

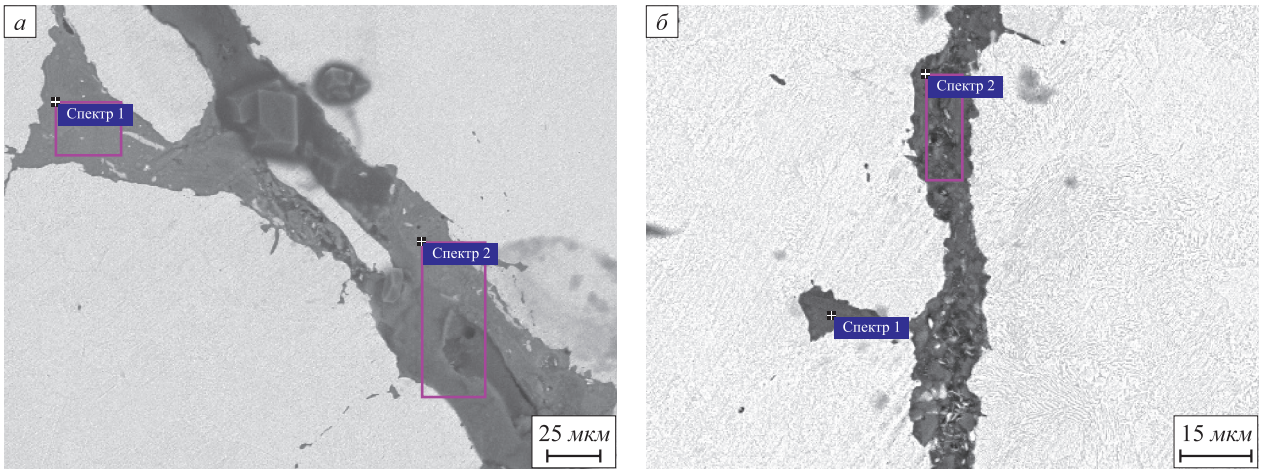
Показатель	Максимальный диаметр отдельных глобулярных включений, мкм	Средний диаметр отдельных глобулярных включений, мкм	Максимальная длина строчечных глобулярных включений, мкм	Средняя длина строчечных глобулярных включений, мкм	Суммарный коэффициент загрязненности мкм^2/мм^2
ГОСТ Р 51685 – 2013	30	20	705	500	30
Опытная технология	11	11	176	104,5	2,24

Таблица 6

Механические свойства рельсовой стали Э76Ф

Table 6. **Mechanical properties of E76F rail steel**

Показатель	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость, Дж/см^2
ГОСТ Р 51685 – 2013	не менее				
	1180	800	9	25	15
Опытная технология	1310	940	12	25	30



Проба		Содержание химических элементов, %									
		O	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Mn	Fe
Рис. 3, *а*	Спектр 1	38,52	2,38	1,61	23,18	20,87	0,62	1,09	0,77	8,36	1,76
	Спектр 2	44,55	2,30	1,07	15,33	16,85	2,26	2,15	1,49	13,99	–
Рис. 3, *б*	Спектр 1	38,57	3,57	0,84	17,50	23,68	–	2,50	5,57	5,31	1,70
	Спектр 2	32,93	1,51	0,69	33,49	8,20	0,74	1,01	2,50	3,52	14,78

Рис. 3. Неметаллические включения в рельсе

Fig. 3. Nonmetallic inclusions in a rail

лических включениях калия и натрия, которые присутствуют в шлакообразующей смеси (ШОС) для кристаллизатора, свидетельствует о попадании частиц ШОС в металл во время непрерывной разливки стали.

Выводы

В результате производства рельсовой стали Э76Ф по опытной технологии в условиях АО «Уральская Сталь» установлено следующее.

Определены причины возможного образования недеформируемых неметаллических включений на основе оксидов алюминия, являющиеся причиной брака рельсов по ультразвуковому контролю.

Разработаны рекомендации для корректировки технологии производства рельсовой стали Э76Ф в условиях АО «Уральская Сталь» с заменой ферросилиция марки FeSi65 на карбид кремния.

Экспериментально подтверждено, что технология легирования карбидом кремния рельсовой стали Э76Ф в условиях АО «Уральская Сталь» технически возможна.

Показано, что служебные характеристики непрерывнолитой заготовки рельсовой стали Э76Ф, произведенной по опытной технологии с применением карбида кремния, соответствуют требованиям ГОСТ Р 51685 – 2013.

Получено увеличение выхода годных 100-метровых рельсов, произведенных из непрерывнолитой заготовки АО «Уральская Сталь» на 17 %.

Список литературы / References

1. Грузовой железнодорожный транспорт России в 2010 – 2015 гг.: Аналитический доклад. Институт проблем естественных монополий, май 2016. С. 2–4.
2. Анисимов Н.К., Зубов С.П., Кузнецов М.С., Шепелев Д.С., Григорович К.В., Григорьев А.М. Оптимизация технологии производства непрерывнолитой заготовки транспортного металла для производства железнодорожных рельс с целью повышения технико-экономической эффективности использования новых материалов // Сборник трудов XV Международного конгресса сталеплавильщиков. Тула, 2018. С. 419–422.
3. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. / Под общ. ред. А.С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.
4. Григорович К.В., Трушникова А.С., Арсенкин А.М., Шибаев С.С., Гарбер А.К. Исследование структуры и металлургичес-

1. *Freight rail transport in Russia in 2010 – 2015: Analytical report.* Institute for Natural Monopoly Problems, May 2016, pp. 2–4. (In Russ.).
2. Anisimov N.K., Zubov S.P., Kuznetsov M.S. , Shepelev D.S., Grigorovich K.V., Grigor'ev A.M. Optimization of the production technology of continuously cast blanks from transport metal for the production of railway rails in order to increase technical and economic efficiency of the new materials use. In: *Proceedings of the XV Int. Congr. of Steelmakers*. Tula, 2018, pp. 419–422. (In Russ.).
3. Zubchenko A.S., Koloskov M.M., Kashirskii Yu.V., etc. *Grade Guide of Steels and Alloys*. Zubchenko A.S. ed. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 784 p. (In Russ.).
4. Grigorovich K.V., Trushnikova A.S., Arsenkin A.M., Shibaev S.S., Garber A.K. Structure and metallurgical quality of rail steels pro-

кого качества рельсовых сталей различных производителей // Металлы. 2006. № 5. С. 1–16.

5. Шур Е.А., Трусова Т.Н., Григорович К.В., Трушевский С.М. Применение фракционного газового анализа для оценки эксплуатационных свойств рельсов // Материалы юбилейной рельсовой комиссии. Новокузнецк, 2002. С. 229–248.
6. Григорович К.В., Арсенкин А.М., Трушникова А.С. и др. Неметаллические включения: оценка и прогноз эксплуатационной стойкости рельсов // Неметаллические включения в рельсовой стали: Сборник научных трудов. Екатеринбург: УИМ, 2005. С. 102–115.
7. Корнева Л.В., Юнин Г.Н., Козырев Н.А., Атконова О.П., Полевой Е.В. Сравнительный анализ показателей качества рельсов ОАО «Новокузнецкий металлургический комбинат» и зарубежных производителей // Известия вузов. Черная металлургия. 2010. № 12. С. 38–42.
8. Шур Е.А. Повреждение рельсов. М.: Интекст, 2012. 192 с.
9. Шейнман Е. Износ рельсов // Трение и износ. 2012. Т. 33. № 4. С. 413–422.
10. Hu Y., Zhou L., Ding H.H., Lewis R., Liu Q.Y., Guo J., Wang W.J. Microstructure evolution of railway pearlitic wheel steels under rolling-sliding contact loading // Tribology International. 2021. Vol. 154. Article 106685. *http://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106685*
11. Liu P., Quan Y., Wan J. Yu L. Experimental investigation on the wear and damage behaviors of machined wheel-rail materials under dry sliding conditions // Materials. 2021. Vol. 14. No. 3. Article 540. *http://doi.org//10.3390/ma14030540*
12. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in evaluation and control of steel cleanliness // ISIJ International. 2003. Vol. 43. No. 3. P. 271–291. *http://doi.org//10.2355/isijinternational.43.271*
13. Zhao K.-w., Zeng J.-h., Wang X.-h. Nonmetallic inclusion control of 350 km/h high speed rail steel // Journal of Iron and Steel Research International. 2009. Vol. 16. No. 3. P. 20–26. *http://doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60038-8*
14. Fruehan R.J., Nassaralla C.L. Evaluation of new steelmaking technologies // McLean Symposium Proceedings, Iron & Steel Society, Warrendale, 1998. P. 205–216.
15. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in the control of inclusions during steel ingot casting // Metallurgical and Materials Transactions B. 2006. Vol. 37. No. 5. P. 733–761. *http://doi.org/10.1007/s11663-006-0057-0*
16. Wijk O., Brabie V. The purity of ferrosilicon and its influence on inclusion cleanliness of steel // ISIJ International. 1996. No. 36. P. 132–135. *https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.suppl_s132*
17. Steelmaking Data Sourcebook. N.Y.-Tokyo: Gordon&Breach Science Publ., 1988. 325 p.
18. Снитко Ю.П., Суровой Ю.Т., Лякишев Н.П. Соотношение между параметрами взаимодействия и атомными характеристиками компонентов // Доклады АН СССР. 1983. Т. 268. № 5. С. 1154–1156.
19. Katsnelson A.M., Dashevskiy V.Ya., Kashin V.I. Carbon activity in Fe-, Co-, Ni- and Mn-based melts at 1873 K // Steel Research. 1993. Vol. 64. P. 197–202. *http://doi.org/10.1002/srin.199301008*
20. Sigworth G.K., Elliott J.F. The thermodynamics of liquid dilute iron alloys // Metal Science. 1974. Vol. 8. No. 9. P. 298–308. *https://doi.org/10.1179/msc.1974.8.1.298*
21. The Recommended Values for the Reaction in Steelmaking. 2nd ed., ed. by the 19 Committee (Ironmaking), Japan Soc. Promotion of Sci., Tokyo. 1984. 254 p.

duced by various manufacturers. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2006, vol. 2006, no. 5, pp. 427–438.

5. Shur E.A., Trusova T.N., Grigorovich K.V., Trushevskii S.M. Application of fractional gas analysis to assess rails performance. In: *Materials of the Jubilee Rail Commission*. Novokuznetsk 2002, pp. 229–248. (In Russ.).
6. Grigorovich K.V., Arsenkin A.M., Trushnikova A.S., etc. Application of fractional gas analysis to assess the performance properties of rail steel. In: *Improving the Quality and Service Life of Rail Steel. Proceedings*. Yekaterinburg: UIM, 2005, pp. 102–115. (In Russ.).
7. Korneva L.V., Yunin G.N., Kozyrev N.A., Atkonova O.P., Polevoi E.V., Comparative analysis of rail product quality indexes of JSC "Novokuznetsk Metallurgical Plant" and foreign manufacturers. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2010, no. 12, pp. 38–42. (In Russ.).
8. Shur E.A. *Rail Damage*. Moscow: Intekst, 2012, 192 p. (In Russ.).
9. Sheinman E. Rail wear. *Trenie i iznos*. 2012, vol. 33, no. 4, pp. 413–422. (In Russ.).
10. Hu Y., Zhou L., Ding H.H., Lewis R., Liu Q.Y., Guo J., Wang W.J. Microstructure evolution of railway pearlitic wheel steels under rolling-sliding contact loading. *Tribology International*. 2021, vol. 154, article 106685. *http://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106685*
11. Liu P., Quan Y., Wan J. Yu L. Experimental investigation on the wear and damage behaviors of machined wheel-rail materials under dry sliding conditions. *Materials*. 2021, vol. 14, no. 3, article 540. *http://doi.org//10.3390/ma14030540*
12. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in evaluation and control of steel cleanliness. *ISIJ International*. 2003, vol. 43, no. 3, pp. 271–291. *http://doi.org//10.2355/isijinternational.43.271*
13. Zhao K.-w., Zeng J.-h., Wang X.-h. Nonmetallic inclusion control of 350 km/h high speed rail steel. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2009, vol. 16, no. 3, pp. 20–26. *http://doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60038-8*
14. Fruehan R.J., Nassaralla C.L. Evaluation of new steelmaking technologies. In: *McLean Symposium Proceedings, Iron & Steel Society, Warrendale, 1998*, pp. 205–216.
15. Zhang L., Thomas B.G. State of the art in the control of inclusions during steel ingot casting. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2006, vol. 37, no. 5, pp. 733–761. *http://doi.org/10.1007/s11663-006-0057-0*
16. Wijk O., Brabie V. The purity of ferrosilicon and its influence on inclusion cleanliness of steel. *ISIJ International*. 1996, no. 36, pp. 132–135. *https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.suppl_s132*
17. *Steelmaking Data Sourcebook*. N.Y.-Tokyo: Gordon&Breach Science Publ, 1988, 325 p.
18. Snitko Yu.P., Surovoi Yu.T., Lyakishev N.P. Relationship between interaction parameters and atomic characteristics of components. *Doklady AN SSSR*. 1983, vol. 268, no. 5, pp. 1154–1156. (In Russ.).
19. Katsnelson A.M., Dashevskiy V.Ya., Kashin V.I. Carbon activity in Fe-, Co-, Ni- and Mn-based melts at 1873 K. *Steel Research*. 1993, vol. 64, pp. 197–202. *http://doi.org/10.1002/srin.199301008*
20. Sigworth G.K., Elliott J.F. The thermodynamics of liquid dilute iron alloys. *Metal Science*. 1974, vol. 8, no. 9, pp. 298–308. *https://doi.org/10.1179/msc.1974.8.1.298*
21. *The Recommended Values for the Reaction in Steelmaking*. 2nd ed., ed. by the 19 Committee (Ironmaking), Japan Soc. Promotion of Sci., Tokyo. 1984, 254 p.

Сведения об авторах / Information about the authors

Антон Михайлович Григорьев, *аспирант кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов,* Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
ORCID: 0000-0001-9317-6491
E-mail: antonmgrigoryev@gmail.com

Максим Сергеевич Кузнецов, *к.т.н., начальник управления технического сопровождения сталеплавильного производства,* АО «Уральская Сталь»
E-mail: m.kuznetsov@uralsteel.com

Денис Сергеевич Шепелев, *главный специалист по сталеплавильному производству,* АО «Уральская Сталь»

Евгений Михайлович Алексеев, *главный специалист по испытаниям центральной лаборатории комбината,* АО «Уральская Сталь»

Константин Всеволодович Григорович, *академик РАН, д.т.н., профессор кафедры металлургии стали, новых производственных технологий и защиты металлов,* Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», *заведующий лабораторией диагностики материалов,* Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова, РАН
ORCID: 0000-0002-5669-4262

Anton M. Grigor'ev, *Postgraduate of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection,* National University of Science and Technology "MISIS"
ORCID: 0000-0001-9317-6491
E-mail: antonmgrigoryev@gmail.com

Maksim S. Kuznetsov, *Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Steelmaking Production Technical Support,* JSC "Ural Steel"
E-mail: m.kuznetsov@uralsteel.com

Denis S. Shepelev, *Chief Specialist in Steelmaking,* JSC "Ural Steel"

Evgenii M. Alekseev, *Chief Specialist on Tests of the Central Laboratory,* JSC "Ural Steel"

Konstantin V. Grigorovich, *Academician, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Metallurgy of Steel, New Production Technologies and Metal Protection,* National University of Science and Technology "MISIS", *Head of the Laboratory of Materials Diagnostics,* Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-5669-4262

Поступила в редакцию 15.02.2021
После доработки 17.02.2021
Принята к публикации 16.04.2021

Received 15.02.2021
Revised 17.02.2021
Accepted 16.04.2021

Оригинальная статья
УДК 669.15-198:541.124
DOI 10.17073/0368-0797-2021-5-353-359

Термодинамическое моделирование восстановления железа и никеля из расплава B_2O_3 – CaO – Fe_2O_3 – NiO смесями CO – CO_2 и H_2 – H_2O

А. С. Вусихис[1], **Л. И. Леонтьев**[1, 2, 3], **Е. Н. Селиванов**[1]

[1] **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. Для прогнозирования условий восстановления металлов из оксидного расплава газом в барботажных процессах разработана методика термодинамического моделирования, обеспечивающая приближение к реальным системам. Основное отличие принятой методики от известных заключается в проведении последовательных расчетных циклов с выводом из состава рабочего тела образовавшихся газов и металлической фазы. В представленной работе приведены результаты термодинамического моделирования процессов восстановления никеля и железа из расплавов B_2O_3–CaO–Fe_2O_3–NiO смесями CO–CO_2 и H_2–H_2O, содержащими 0 – 60 % CO_2 (H_2O) в интервале температур 1273 – 1673 К. В ходе расчетов оценивали содержание оксидов никеля и железа в расплаве и степень их восстановления. Показано, что независимо от состава газа этот процесс протекает в несколько этапов. На первом этапе происходит восстановление Fe_2O_3 до Fe_3O_4 и FeO. Значения $C_{Fe_2O_3}$ уменьшаются почти до нуля, одновременно увеличиваются $C_{Fe_3O_4}$ и C_{FeO}. К концу этапа $C_{Fe_3O_4}$ достигает максимального значения. На втором этапе происходит переход $Fe_3O_4 \rightarrow FeO$, когда значения C_{FeO} достигают максимума, никель и железо начинают восстанавливаться до металла. При восстановлении смесью CO–CO_2 повышение температуры уменьшает металлизацию как никеля, так и железа. Аналогично влияет увеличение содержания CO_2 во вводимом газе. В процессе взаимодействия оксидного расплава с газом, содержащим 60 % CO_2, третий этап отсутствует. При восстановлении смесью H_2–H_2O повышение температуры уменьшает металлизацию никеля, но увеличивает железа. С ростом содержания во вводимом газе паров воды снижается степень металлизации как никеля, так и железа. Полученные данные полезны для создания технологий селективного восстановления металлов и формирования ферроникеля требуемого состава.

Ключевые слова: методика, термодинамическое моделирование, кинетика, восстановительный газ, барботаж, многокомпонентный оксидный расплав, никель, железо

Финансирование: работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 18-29-24093.

Для цитирования: Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Селиванов Е.Н. Термодинамическое моделирование восстановления железа и никеля из расплава B_2O_3–CaO–Fe_2O_3–NiO смесями CO–CO_2 и H_2–H_2O // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 353–359. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-353-359

Original article

Thermodynamic modeling of nickel and iron reduction from B_2O_3 – CaO – Fe_2O_3 – NiO melt by CO – CO_2 and H_2 – H_2O mixtures

A. S. Vusikhis[1], **L. I. Leont'ev**[1, 2, 3], **E. N. Selivanov**[1]

[1] **Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science** (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)
[2] **National University of Science and Technology "MISIS" (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. To predict the conditions for metals reduction from an oxide melt by gas in bubbling processes, a thermodynamic modeling technique has been developed that provides an approximation to real systems. The main difference between the accepted method and the well-known one is in conducting successive calculation cycles with withdrawal of the generated gases and the metal phase from the working medium. This paper presents the results of thermodynamic modeling of nickel and iron reduction processes from B_2O_3–CaO–Fe_2O_3–NiO melts by mixtures of CO–CO_2 and H_2–H_2O containing 0 – 60 % CO_2 (H_2O) in the temperature range of 1273 – 1673 K. The calculations evaluated the content of nickel and iron oxides in the melt and the degree of their reduction. It is shown that, regardless of the gas composition, this process proceeds in several stages. At the first stage, Fe_2O_3 is reduced to Fe_3O_4 and FeO. $C_{Fe_2O_3}$ values decrease to almost zero, while $C_{Fe_3O_4}$ and C_{FeO} increase simultaneously. By the end of the phase, $C_{Fe_3O_4}$ reaches

its maximum value. At the second stage, the $Fe_3O_4 \rightarrow FeO$ transition occurs, when C_{FeO} values reach maximum, nickel and iron begin to reduce to metal. At reduction by $CO-CO_2$ mixture, an increase in temperature reduces the metallization of both nickel and iron. Similarly, an increase in the CO_2 content of the introduced gas affects. During interaction of the oxide melt with a gas containing 60 % CO_2, the third stage is absent. At reduction by H_2-H_2O mixture, an increase in temperature reduces the metallization of nickel, but increases metallization of iron. With increasing water vapor content in the introduced gas, the degree of metallization of both nickel and iron decreases. The obtained data are useful for creating technologies for selective reduction of metals and formation of ferronickel of the required composition.

Keywords: methodology, thermodynamic modeling, kinetics, reducing gases, bubbling processing, multicomponent oxide melts, nickel, iron

Funding: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 18-29-24093.

For citation: Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Selivanov E.N. Thermodynamic modeling of nickel and iron reduction from $B_2O_3-CaO-Fe_2O_3-NiO$ melt by $CO-CO_2$ and H_2-H_2O mixtures. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 5, pp. 353–359. (In Russ.).
https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-353-359

Технологии, в основе которых лежат барботажные процессы, широко распространены в черной [1 – 4] и цветной [5 – 10] металлургии. В связи с этим изучению этих процессов, в частности барботажного восстановления металлов из оксидных расплавов, посвящено большое количество исследований [11 – 14]. Следует отметить, что в подавляющем большинстве работ рассматривали неравновесные процессы. В связи с этим, для одних и тех же расплавов, в зависимости от параметров эксперимента, кинетические параметры процесса могут быть различными. В реальных условиях барботажного процесса полнота взаимодействия определяется продолжительностью нахождения газа в расплаве, его физико-химическими свойствами (вязкость, плотность и поверхностное натяжение), глубиной погружения фурмы, параметрами газовой струи [15]. При значительном погружении фурмы, малых размерах формирующихся пузырей и высокой вязкости расплава состав отходящих газов, образующихся в ходе взаимодействия газа с компонентами расплава, близок к равновесному [16]. В этом случае, при высокой интенсивности перемешивания расплава, взаимодействие газа с расплавом будет приближено к равновесному, определяемому термодинамическими свойствами системы. Тем самым создаются условия для количественного описания барботажных процессов и минимизации экспериментальных работ [17, 18].

Методы термодинамического моделирования (ТДМ) широко используют при решении теоретических и прикладных задач совершенствования металлургических технологий [19 – 23]. Однако существующие методологии ТДМ предназначены для анализа равновесия в замкнутых системах и позволяют прогнозировать составы равновесных фаз и прослеживать равновесное распределение компонентов по продуктам в широких температурных интервалах. Предложена методика [17, 18], позволяющая использовать ТДМ для описания процессов восстановления металлов при барботаже газом многокомпонентных оксидных расплавов в приближении к реальным системам. Основное отличие принятой методики от известных заключается в проведении последовательных расчетных циклов с выводом из состава рабочего тела образовавшихся газов и металлической фазы. Применение методики к действующим и разрабатываемым технологиям позволяет определять, в зависимости от количества введенного газа-восстановителя (V_g), следующие величины: содержание оксидов (C_{MeO}) в шлаке и металлов (C_{Me}) в сплавах, коэффициенты перехода компонентов в элементное состояние (φ_{Me}) и распределение элементов. Особенность методики состоит в том, что равновесие определяют для каждой единичной порции газа, вводимой в рабочее тело, а содержание оксидов восстанавливаемых металлов в каждом расчетном цикле принимают из предшествующих данных. Этот подход позволяет моделировать процессы и качественно оценить полноту протекания реакций в пирометаллургических агрегатах, использующих барботаж расплава газом-восстановителем.

В представленной работе приведены результаты моделирования совместного восстановления никеля и железа в системе $B_2O_3-CaO-Fe_2O_3-NiO$ смесями $CO-CO_2$ и H_2-H_2O при различных температурах. Соотношение B_2O_3/CaO в исходном рабочем теле принято равным 3,0, а содержание Fe_2O_3 и NiO – 20 и 2 % (по массе) соответственно. Расчеты проведены для интервала температур 1473 – 1673 К и давления 0,1 МПа. Каждый единичный цикл расчета включал добавку порции газа 7,2 дм^3/кг. Содержание CO в смесях $CO-CO_2$ и H_2 в H_2-H_2O меняли от 40 до 100 %. Для упрощения расчетов принято, что оксидная и металлическая фазы являются идеальными растворами.

В ходе моделирования принимали во внимание такие параметры, как содержание оксидов железа ($C_{Fe_2O_3}$, $C_{Fe_3O_4}$, C_{FeO}) и никеля (C_{NiO}) в оксидном расплаве, текущее (C'_{Ni}) и суммарное (C_{Ni}) содержание никеля в образовавшемся сплаве, а также степень металлизации по железу (φ_{Fe}) и никелю (φ_{Ni}). Последние принимали как отношение количества восстановленного до металлического состояния к находящемуся в исходном рабочем теле железа или никеля, выраженное в процентах. Выявленные показатели сопоставляли с количеством введенного газа (V_g, дм^3/кг).

Как следует из полученных данных (рис. 1), процесс восстановления протекает поэтапно: первоначально оксиды железа переходят в низшее валентное состояние, а затем образуется металлический никель. Моделирование процесса в газовой среде из монооксида углерода

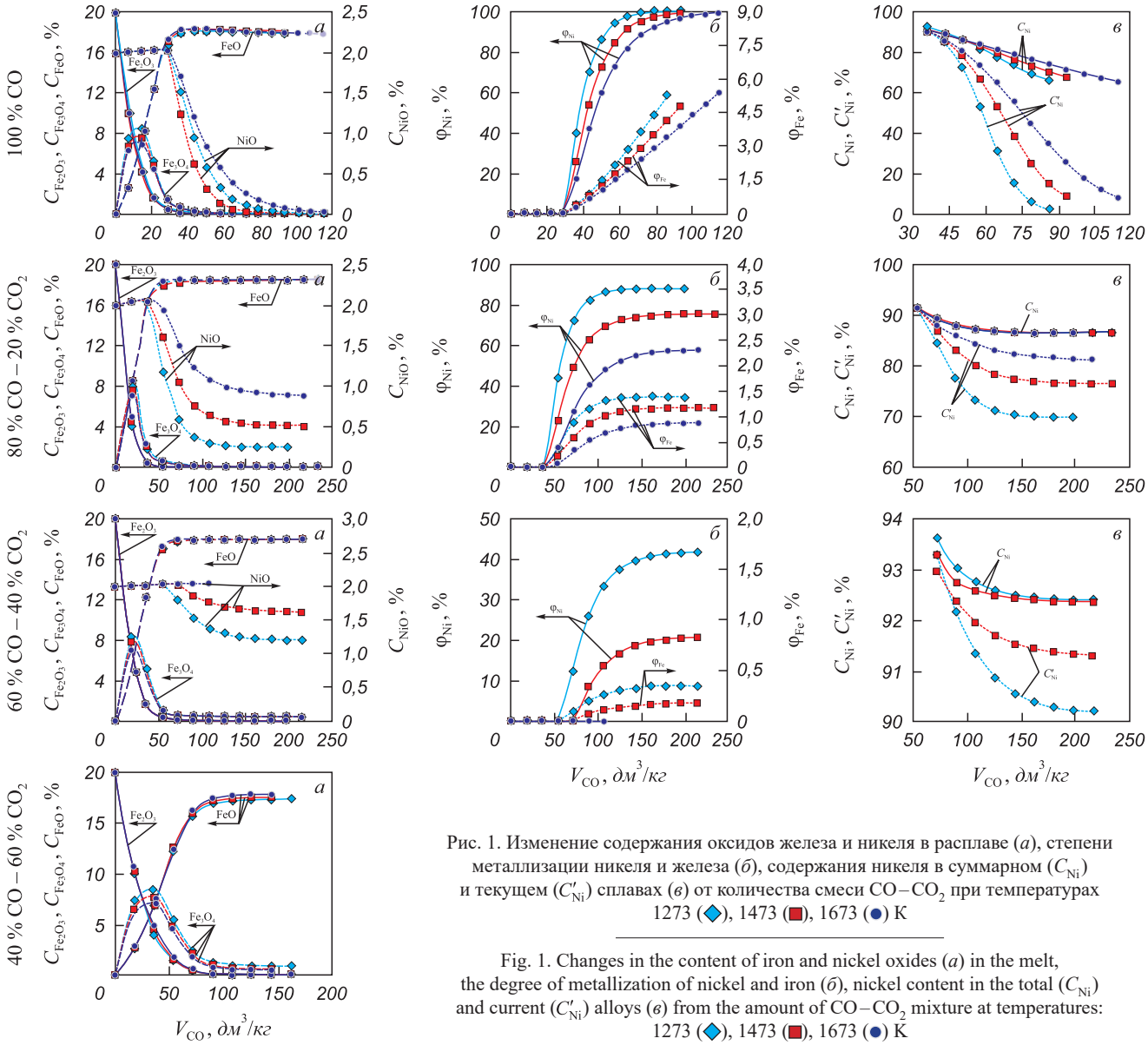


Рис. 1. Изменение содержания оксидов железа и никеля в расплаве (*а*), степени металлизации никеля и железа (*б*), содержания никеля в суммарном (C_{Ni}) и текущем (C'_{Ni}) сплавах (*в*) от количества смеси $CO-CO_2$ при температурах 1273 (◆), 1473 (■), 1673 (●) K

Fig. 1. Changes in the content of iron and nickel oxides (*a*) in the melt, the degree of metallization of nickel and iron (*б*), nickel content in the total (C_{Ni}) and current (C'_{Ni}) alloys (*в*) from the amount of $CO-CO_2$ mixture at temperatures: 1273 (◆), 1473 (■), 1673 (●) K

показывает, что для полного перевода Fe_2O_3 в FeO, при исходном значении $C_{Fe_2O_3}$, равном 20 %, необходимо ввести газ в количестве около 30 дм^3/кг. Для последующего перевода никеля в металлическое состояние необходимо вводить около 50 дм^3/кг CO. Важно отметить, что на стадии восстановления оксидов железа до двухвалентного состояния температура практически не влияет на процесс, в то время как при переводе никеля и железа в металл она имеет значимое влияние. Причем, по значениям C_{Ni}, φ_{Ni} и φ_{Fe} лучшие показатели достигнуты при пониженных температурах.

В связи с тем, что степень восстановления никеля приближается к 100 %, в то время как этот показатель для железа не превышает 6 %, удается выделить сплав с 60 – 90 % Ni. На начальной стадии восстановления никеля C_{Ni} и C'_{Ni} близки между собой. При более высоких степенях восстановления доля оксида никеля в расплаве снижается, что влияет на значения C_{Ni} и C'_{Ni}. В каждом текущем расчетном цикле величина C'_{Ni} снижается и приближается к нулю при практически полном восстановлении никеля. Выделяемый металл на этой стадии представлен металлическим железом.

Снижение содержания монооксида углерода во вводимом газе заметно меняет как равновесные содержания C_{Ni} и C'_{Ni}, так и полноту восстановления металлов. Ведение в рабочее тело 180 дм^3/кг смеси 80 % CO – 20 % CO_2 позволят достичь следующих степеней восстановления металлов:

Температура, K	1273	1473	1673
φ_{Ni}, %	94,8	94,6	94,0
φ_{Fe}, %	2,3	3,1	3,6

Дальнейшее уменьшение доли монооксида углерода в газовой смеси сопровождается снижением значений φ_{Ni} и φ_{Fe}. Уже при 40 % CO в газовой смеси образования металлов не происходит.

Взаимодействие оксидов никеля и железа системы $B_2O_3–CaO–Fe_2O_3–NiO$ с водородом (рис. 2) в принципе не меняет закономерностей, выявленных для CO. В обоих случаях процесс можно разделить на три этапа: первоначально происходит снижение значения $C_{Fe_2O_3}$, но увеличение $C_{Fe_3O_4}$ и C_{FeO}, затем снижение $C_{Fe_2O_3}$ и $C_{Fe_3O_4}$ с ростом C_{FeO}, и лишь после этого образование металлов, сопровождающееся снижением C_{NiO} и C_{FeO}.

На первоначальных этапах протекают реакции:

$$Fe_2O_3 + CO\,(H_2) \rightarrow Fe_3O_4 + CO_2\,(H_2O); \qquad (1)$$

$$Fe_3O_4 + CO\,(H_2) \rightarrow FeO + CO_2\,(H_2O), \qquad (2)$$

ведущие к некоторому уменьшению массы расплава, что при сохранении массы оксида никеля повышает значение C_{NiO}. На восстановление высших оксидов железа до двухвалентного состояния требуется примерно одинаковое количество CO и H_2.

Температура мало влияет на рассматриваемые показатели процесса на начальных этапах восстановления оксидов железа до FeO, но существенно – в период образования металлов. Отличия состоят в том, что водород как более активный восстановитель обеспечивает необходимые значения φ_{Ni} и φ_{Fe} при меньших величинах V_{H_2}. Кроме того, даже использование смесей $H_2–H_2O$ с низкой долей водорода (40 %) не прекращает

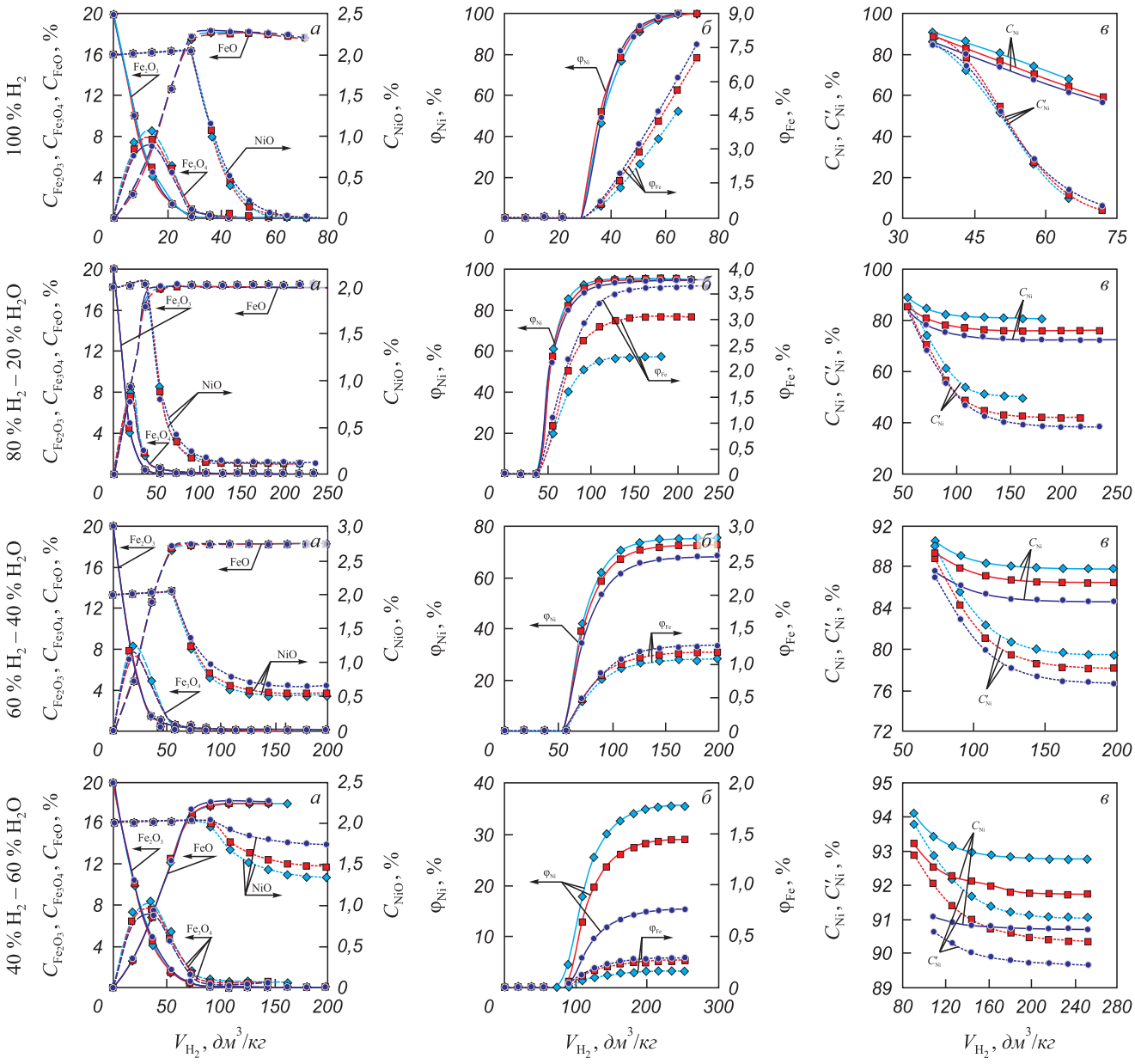


Рис. 2. Изменение содержания оксидов железа и никеля в расплаве (*а*), степени металлизации никеля и железа (*б*), содержания никеля в суммарном (C_{Ni}) и текущем (C'_{Ni}) сплавах (*в*) от количества смеси $H_2–H_2O$ при температурах 1273 (◆), 1473 (■), 1673 (●) К

Fig. 2. Changes in the content of iron and nickel oxides (*a*) in the melt, the degree of metallization of nickel and iron (*б*), nickel content in the total (C_{Ni}) and current (C'_{Ni}) alloys (*в*) from the amount of $H_2–H_2O$ mixture at temperatures: 1273 (◆), 1473 (■), 1673 (●) K

восстановление металлов, хотя значения φ_{Ni} и φ_{Fe} заметно снижаются.

К заключительному циклу расчетов (табл. 1, 2) состояние системы B_2O_3–CaO–Fe_2O_3–NiO характеризуется практически полным переходом оксидов железа в низшее валентное состояние: остаточное содержание Fe^{3+}, определяемое величинами $C_{Fe_2O_3}$ и $C_{Fe_3O_4}$, составляет доли процента. Снижение парциального давления газа-восстановителя (CO или H_2) в рабочем теле существенно сказывается на достигаемых показателях.

Таблица 1

Равновесные параметры системы B_2O_3–CaO–Fe_2O_3–NiO после обработки смесями CO–CO_2, отвечающие заключительному циклу расчетов

Table 1. **Equilibrium parameters of B_2O_3–CaO–Fe_2O_3–NiO system after treatment by CO–CO_2 mixtures, corresponding to the final calculation cycle**

$CO_{исх}$, %	*T*, K	V_g, дм^3/кг	$C_{Fe_2O_3}$, % (по массе)	$C_{Fe_3O_4}$, % (по массе)	C_{FeO}, % (по массе)	C_{NiO}, % (по массе)	φ_{Ni}, %	φ_{Fe}, %	C_{Ni}, % (по массе)	$CO_{кон.}$, %
100	1273	86	0,01	0,051	17,8	0,00	99,9	5,2	66,0	93,0
	1473	94	0,01	0,033	17,9	0,015	99,3	4,8	67,9	94,1
	1673	115	0,01	0,012	17,9	0,018	99,1	5,4	65,1	95,2
80	1273	198	0,03	0,18	18,3	0,25	88,0	1,4	86,5	80,0
	1473	234	0,03	0,14	18,3	0,51	75,4	1,2	86,6	80,0
	1673	252	0,03	0,11	18,3	0,87	57,9	0,9	87,0	80,0
60	1273	216	0,09	0,41	18,0	1,21	41,5	0,4	92,4	60,0
	1473	220	0,09	0,36	17,9	1,63	20,6	0,2	92,4	60,0
	1673	108	0,08	0,27	18,1	2,04	0,0	0	0	60,0
40	1273	144	0,19	0,95	17,4	2,04	0,0	0	0	40,0
	1473	144	0,18	0,75	17,5	2,04	0,0	0	0	40,0
	1673	162	0,17	0,57	17,7	2,04	0,0	0	0	40,0

Таблица 2

Равновесные параметры системы B_2O_3–CaO–Fe_2O_3–NiO после обработки смесями H_2–H_2O, отвечающие заключительному циклу расчетов

Table 2. **Equilibrium parameters of B_2O_3–CaO–Fe_2O_3–NiO system after treatment by H_2–H_2O mixtures, corresponding to the final calculation cycle**

$H_{2исх}$, %	*T*, K	V_g, дм^3/кг	$C_{Fe_2O_3}$, % (по массе)	$C_{Fe_3O_4}$, % (по массе)	C_{FeO}, % (по массе)	C_{NiO}, % (по массе)	φ_{Ni}, %	φ_{Fe}, %	C_{Ni}, % (по массе)	$H_{2кон.}$, %
100	1273	72	0,01	0,06	17,7	0,003	99,9	6,0	62,8	88,9
	1473	72	0,01	0,03	17,5	0,006	99,7	7,1	58,8	87,3
	1673	72	0,01	0,02	17,4	0,01	99,5	7,6	56,9	86,4
80	1273	180	0,02	0,11	18,3	0,11	94,8	2,3	80,5	80,0
	1473	298	0,01	0,06	18,2	0,11	94,6	3,1	75,8	80,0
	1673	216	0,01	0,03	18,1	0,12	94,1	3,6	72,4	80,0
60	1273	198	0,04	0,20	18,3	0,51	75,3	1,1	87,9	60,0
	1473	198	0,04	0,15	18,3	0,56	73,0	1,1	86,5	60,0
	1673	216	0,03	0,08	18,3	0,66	68,3	1,3	84,6	60,0
40	1273	252	0,10	0,44	18,0	1,32	35,6	0,3	92,8	40,0
	1473	252	0,08	0,33	18,1	1,46	29,1	0,3	91,7	40,0
	1673	252	0,06	0,19	18,2	1,73	15,4	0,2	90,7	40,0

В первую очередь оно отражается на величинах φ_{Ni} и φ_{Fe}. Например, содержание никеля в сплаве Fe–Ni повышается с 60 до 90 %.

Полученные данные позволяют судить о возможном селективном восстановлении никеля из оксидного расплава с сохранением основной массы железа в виде оксидов. Варьированием состава газовой смеси и температуры можно добиться требуемых значений φ_{Ni} и φ_{Fe}, а также необходимого состава сплава (ферроникеля) по основным компонентам. Повышение окислительного потенциала газовой фазы требует не только большего количества вводимой газовой смеси, но и ограничивает полноту протекания процесса. Стремление к полноте завершения процесса не оправдано при использовании смеси газов с низким восстановительным потенциалом. Такие действия ведут к образованию большого количества газов с повышенным содержанием CO и H_2. Их использование возможно в качестве вторичных энергоресурсов для выработки электроэнергии или обогрева вращающихся обжиговых печей, но сложно в исполнении в связи с необходимостью перемещения больших объемов горючих и экологически опасных потоков.

Выводы

Методами термодинамического моделирования проведена оценка параметров восстановления никеля и железа из расплавов $B_2O_3–CaO–Fe_2O_3–NiO$ газовыми смесями $CO–CO_2$ и $H_2–H_2O$. Поэтапные изменения в составе расплавов связаны с последовательным восстановлением железа до двухвалентного состояния, и, затем, никеля до металла. Полученные данные полезны для создания технологий селективного восстановления металлов и формирования ферроникеля требуемого состава.

Список литературы

1. Явойский А.В., Харлашин П.С., Чаудри Т.М. Научные основы современных сталеплавильных процессов. Мариуполь: ПГТУ, 2003. 276 с.
2. Морозов А.П., Агапитов Е.Б. Интенсификация комплексной обработки стали при циркуляционном вакуумировании с плазменным нагревом. Магнитогорск: МГТУ, 2003. 139 с.
3. Romenets V.A. Romelt Process // I&SM (Iron & Steelmaker). 1995. Vol. 22. No. 1. P. 37–41.
4. Дорофеев Г.А., Янтовский П.Р., Смирнов К.Г., Степанов Я.М. Процесс ORIEN для выплавки высококачественных сталей из рудного и энергетического сырья на приципе самоэнергообеспечения // Черные металлы. 2017. № 5. С. 17–23.
5. Плавка в жидкой ванне / А.В. Ванюков, В.П. Быстров, А.Д. Васкевич и др. М.: Металлургия, 1986. 259 с.
6. Schlesinger M.E., King M.J., Sole K.C., Davenport W.G. Extractive Metallurgy of Copper. 5th Edition. Elsevier, 2011. 481 p.
7. Vignes A. Extractive Metallurgy 3: Processing Operations and Routes. ISTE Ltd, John Wiley & Sons, Inc., 2011. 352 p.
8. Bakker M.L., Nikolic S., Burrows A.S., Alvear G.R.F. ISACONVERTTM – continuous converting of nickel/PGM mattes // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2011. Vol. 111. No. 10. P. 285–294.
9. Hughes S., Reuter M.A., Baxter R., Kaye A. AUMELT technology for lead and zinc processing // Proceedings of Lead and Zinc 2008, 25-29 February 2008, South African Institute of Mining and Metallurgy (SAIMM), South Africa. P. 147–162.
10. Цымбулов Л.Б., Князев М.В., Цемехман Л.Ш. и др. Анализ различных вариантов технологической схемы переработки окисленных никелевых руд на ферроникель с применением двухзонной печи Ванюкова // Цветные металлы. 2010. № 10. С. 15–21.
11. Русаков М.Р. Обеднение шлаковых расплавов продувкой восстановительными газами // Цветные металлы. 1985. № 3. С. 40–42.
12. Комков А.А., Баранова Н.В., Быстров В.П. Исследование восстановительного обеднения высокоокисленных шлаков в условиях барботажа // Цветные металлы. 1994. № 12. С. 26–30.
13. Фомичев В.Б., Князев М.В., Рюмин А.А. и др. Исследование процесса обеднения шлаков продувкой их газовыми смесями с различным парциальным давлением кислорода // Цветные металлы. 2002. № 9. С. 32–36.
14. Комков А.А., Камкин Р.Н. О механизме восстановления оксидов при продувке медеплавильных шлаков газовыми смесями

References

1. Yavoiskii A.V., Kharlashin P.S., Chaudri T.M. *Scientific Foundations of Modern Steelmaking Processes*. Mariupol: PSTU, 2003, 276 p. (In Russ.).
2. Morozov A.P., Agapitov E.B. *Intensification of Complex Steel Processing during Plasma-Heated Circulation Vacuuming*. Magnitogorsk: MSTU, 2003, 139 p. (In Russ.).
3. Romenets V.A. Romelt Process. *I&SM (Iron & Steelmaker)*. 1995, vol. 22, no. 1, pp. 37–41.
4. Dorofeev G.A., Yantovsky P.R., Smirnov K.G., Stepanov Ya.M. The process “ORIEN” for smelting of high-quality steels from ore and energy raw materials based on the principle of the energy self-supplying. *Chernye metally*. 2017, no. 5, pp. 17–23. (In Russ.).
5. Vanyukov A.B., Bystrov V.P., Vaskevich A.D., etc. *Melting in a Liquid Bath*. Moscow: Metallurgiya, 1986, 259 p. (In Russ.).
6. Schlesinger M.E., King M.J., Sole K.C., Davenport W.G. *Extractive Metallurgy of Copper*. 5th Edition. Elsevier, 2011, 481 p.
7. Vignes A. *Extractive Metallurgy 3: Processing Operations and Routes*. ISTE Ltd, John Wiley & Sons, Inc., 2011, 352 p.
8. Bakker M.L., Nikolic S., Burrows A.S., Alvear G.R.F. ISACONVERTTM – continuous converting of nickel/PGM mattes. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2011, vol. 111, no. 10, pp. 285–294.
9. Hughes S., Reuter M.A., Baxter R., Kaye A. AUSMELT technology for lead and zinc processing. *Proceedings of Lead and Zinc 2008, 25-29 February 2008, South African Institute of Mining and Metallurgy (SAIMM), South Africa*, pp. 147–162.
10. Tsymbulov L.B., Knyazev M.V., Tsemekhman L.Sh., etc. Analysis of various variants of the technological scheme for processing oxidized nickel ores into ferronickel using a two-zone Vanyukov furnace. *Tsvetnye metally*. 2010, no. 10, pp. 15–21. (In Russ.).
11. Rusakov M.R. Depletion of slag melts by purging with reducing gases. *Tsvetnye metally*. 1985, no. 3, pp. 40–42. (In Russ.).
12. Komkov A.A., Baranova N.V., Bystrov V.P. Research of reducing depletion of highly oxidized slags under bubbling conditions. *Tsvetnye metally*. 1994, no. 12, pp. 26–30. (In Russ.).
13. Fomichev V.B., Knyazev M.V., Ryumin A.A., etc. Slags depletion by purging with gas mixtures at different partial oxygen pressure. *Tsvetnye metally*. 2002, no. 9, pp. 32–36. (In Russ.).
14. Komkov A.A., Kamkin R.N. Mechanism of oxide reduction during copper-smelting slag purging with $CO – CO_2$ gas mixtures. *Izvestiya*

CO – CO_2 // Известия вузов. Цветная металлургия. 2019. № 6. С. 13–22.

15. Вусихис А.С., Ченцов В.П., Кудинов Д.З., Леонтьев Л.И., Селиванов Е.Н. Формирование металлической фазы при барботаже газом-восстановителем многокомпонентного оксидного расплава. Сообщение 1. Теоретические основы процесса // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. № 9. С. 639–644. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-9-639-643
16. Вусихис А.С., Дмитриев А.Н., Леонтьев Л.И., Шаврин С.В. Кинетика восстановления оксидов металлов из расплава газом-восстановителем в барботируемом слое // Материаловедение. 2002. № 10. С. 30–34.
17. Vusikhis A.S., Dmitriev A.N., Kudinov D.Z., Leontiev L.I. The study of liquid and gas phases interaction during the reduction of metal oxides from the melts by gas reductant in bubbled layer // The 3rd Int. Conf. on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Materials Technologies (MMT-2004), Ariel, Israel. 2004. P. 1_72–77.
18. Dmitriev A., Leontiev L., Vusikhis A., Kudinov D. Liquid and gas interaction during reduction in bubbled layer // Proceedings – European Metallurgical Conference. EMC 2005, Dresden, Germany, 2005. Vol. 3. P. 1349–1358.
19. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. М.: Металлургия, 1994. 352 с.
20. Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем. М.: МГТУ, 2013. 96 с.
21. Pickles C. A., Harris C.T., Peacey J., Forster J. Thermodynamic analysis of the Fe–Ni–Co–Mg–Si–O–H–S–C–Cl system for selective sulphidation of a nickeliferous limonitic laterite ore // Minerals Engineering. 2013. Vol. 54. P. 52–62. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.03.029
22. Sohn H.Y. Process modeling in non-ferrous metallurgy. In: Treatise on Process Metallurgy: Industrial Processes. Chapter 2.4. Oxford: Elsevier Ltd. 2014. P. 701–838.
23. Elliott R., Pickles C.A., Forster J. Thermodynamics of the reduction roasting of nickeliferous laterite ores // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 2016. No. 4. P. 320–346.

vuzov. Tsvetnaya metallurgiya. 2019, no. 6, pp. 13–22. (In Russ.).

15. Vusikhis A.S., Chentsov V.P., Kudinov D.Z., Leont'ev L.I., Selivanov E.N. Metallic phase forming in barbotage of multicomponent oxide melt by reduction gas. Report 1. Theoretical basis of the process. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, no. 9, pp. 639-644. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-9-639-643
16. Vusikhis A.S., Dmitriev A.N., Leont'ev L.I., Shavrin S.V. Kinetics of metal oxides reduction from the melt by reducing gas in the bubbled layer. *Materialovedenie*. 2002, no. 10, pp. 30–34. (In Russ.).
17. Vusikhis A.S., Dmitriev A.N., Kudinov D.Z., Leontiev L.I. The study of liquid and gas phases interaction during the reduction of metal oxides from the melts by gas reductant in bubbled layer. *The 3rd Int. Conf. on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Materials Technologies (MMT-2004), Ariel, Israel*. 2004, pp. 1_72-77.
18. Dmitriev A., Leontiev L., Vusikhis A., Kudinov D. Liquid and gas interaction during reduction in bubbled layer. *Proceedings – European Metallurgical Conference EMC 2005, Dresden, Germany*. 2005, vol. 3, pp. 1349–1358.
19. Vatolin N.A., Moiseev G.K., Trusov B.G. *Thermodynamic Modeling in High-Temperature Inorganic Systems*. Moscow: Metallurgiya, 1994, 352 p. (In Russ.).
20. Belov G.V., Trusov B.G. *Thermodynamic Modeling of Chemically Reacting Systems*. Moscow: MSTU, 2013, 96 p. (In Russ.).
21. Pickles C. A., Harris C.T., Peacey J., Forster J. Thermodynamic analysis of the Fe–Ni–Co–Mg–Si–O–H–S–C–Cl system for selective sulphidation of a nickeliferous limonitic laterite ore. *Minerals Engineering*. 2013, vol. 54, pp. 52–62. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.03.029
22. Sohn H.Y. Process modeling in non-ferrous metallurgy. In: *Treatise on Process Metallurgy: Industrial Processes. Chapter 2.4*. Oxford: Elsevier Ltd., 2014, pp. 701–838.
23. Elliott R., Pickles C.A., Forster J. Thermodynamics of the reduction roasting of nickeliferous laterite ores. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2016, no. 4, pp. 320–346.

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

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

Евгений Николаевич Селиванов, *д.т.н., заведующий лабораторией пирометаллургии цветных металлов,* Институт металлургии УрО РАН

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

Leopol'd 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

Evgenii N. Selivanov, *Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Pyrometallurgy of Non-Ferrous Metals,* Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Science

Поступила в редакцию 03.06.2020
После доработки 06.08.2020
Принята к публикации 16.04.2021

Received 03.06.2020
Revised 06.08.2020
Accepted 16.04.2021

Краткое сообщение
УДК 544.32
DOI 10.17073/0368-0797-2021-5-360-362

К ТЕРМОДИНАМИКЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА ИЗ ОКСИДОВ

В. И. Бердников [1], Ю. А. Гудим [2]

[1] **ООО Промышленная компания «Технология металлов»** (Россия, 454018, Челябинск, ул. Косарева, 63, офис 486)
[2] **Южно-Уральский государственный университет** (Россия, 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76)

Аннотация. Выполнено компьютерное моделирование химического процесса прямого восстановления железа в агрегатах, работающих по технологии «Мидрекс». Проведен анализ четырех вариантов такой технологии, различающихся типом исходного сырья и температурой рабочего процесса. Установлено, что при повышении температуры процесса снижается потребный расход природного газа и полностью устраняется метан в отходящем газе. Также отмечено, что при постоянной температуре процесса концентрации всех компонентов системы находятся в линейной зависимости от величины расхода восстановительного газа. Это обстоятельство позволило записать единое балансовое уравнение для всех вариантов изучаемого химического процесса.

Ключевые слова: химические реакции, оксиды железа, термодинамическая система, моделирование процесса, прямое восстановление железа, Мидрекс-процесс

Для цитирования: Бердников В.И., Гудим Ю.А. К термодинамике восстановления железа из оксидов // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 360–362. *https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-360-362*

Short report

ON THERMODYNAMICS OF IRON REDUCTION FROM OXIDES

V. I. Berdnikov [1], Yu. A.Gudim [2]

[1] **LLC Industrial Company “Technology of Metals”** (63 Kosareva Str., Chelyabinsk 454018, Russian Federation)
[2] **South Ural State University** (76 Lenina Ave., Chelyabinsk 454080, Russian Federation)

Abstract. A computer simulation of the chemical process of direct iron reduction in aggregates was performed with the use of MIDREX technology. The analysis of four variants of this technology, which differ in the type of raw material and temperature of the working process, was carried out. It was determined that when the process temperature increased, the required consumption of natural gas decreased, and methane in the waste gas was completely eliminated. It was also noted that at a constant process temperature, the concentrations of all components of the system were linearly dependent on flow rate of the reducing gas. This circumstance allowed us to write a single balance equation for all variants of the studied chemical process.

Keywords: chemical reactions, iron oxides, thermodynamic system, process modeling, direct reduction of iron, MIDREX process

For citation: Berdnikov V.I., Gudim Yu.A. On thermodynamics of iron reduction from oxides. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 5, pp. 360–362. (In Russ.). *https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-360-362*

При прямом восстановлении железа из рудного сырья обычно получают полупродукт, содержащий 80 – 95 % металлизированного (губчатого) железа, с целью последующего передела его в доменных или сталеплавильных печах. В мире около 70 % такого железа производится по технологии «Мидрекс» [1 – 3]. В России она, начиная с 1983 г., поэтапно внедрялась на Оскольском электрометаллургическом комбинате (ОЭМК) [4].

В данном процессе железорудные окатыши обрабатываются в среде восстановительного газа, состоящего примерно на одну треть из оксида углерода и на две трети из водорода. Поэтому химический состав такого газа можно условно представлять формулами $CO(H_2)_2$ или OCH_4. Раньше этот газ получали посредством углекислотно-паровой конверсии природного газа, а позже – путем частичного сжигания природного газа кислородом [4].

Химический процесс восстановления железа по этой технологии моделировали с использованием программного комплекса Терра [5]. Анализировали тер-

Параметры химического процесса металлизации железа

Parameters of the chemical process of iron metallization

Номер варианта	Оксид	t, °C	Расход восстановителя, моли		Температурные параметры		
			n_0	n_1	η_C	η_{CH}	η_H
1	Fe_2O_3	750	0,148	1,336	0,564	0,015	0,627
2		900	0,129	1,162	0,609	0	0,550
3	Fe_3O_4	750	0	1,187	0,564	0,015	0,627
4		900	0	1,033	0,609	0	0,550

модинамическую систему Fe–O–C–H, содержащую 1 моль железа. При этом вводись следующие ограничения методики расчетов:

– перерабатываемые железные руды (гематит, магнетит) представлялись в форме беспримесных оксидов (Fe_2O_3, Fe_3O_4);

– температуры шихты в реакционной зоне принимались равными 750 °C (в агрегатах ранних типов) и 900 °C (в современных агрегатах);

– давление газа в реакционной зоне принималось равным его максимальной величине 0,2026 МПа (2 атм), при минимальном давлении газа (1,3 атм) расчетные показатели процесса изменялись менее, чем на 1 %;

– процессы переработки оценивались балансовыми уравнениями типа <оксид> + nCO(H_2)$_2$ = <продукты реакции>, где n – расход восстановителя.

Далее принималось: n_0 – расход восстановителя в начале процесса металлизации и n_1 – при теоретически достижимой 100 %-ной металлизации железа. Численные значения этих величин для четырех вариантов переработки сырья приведены в таблице. Очевидно, что при переработке магнетита металлизация начинается сразу после ввода восстановителя, а при переработке гематита – при расходах газа $n_0 = \frac{n_1}{9}$ моля, поскольку при меньших расходах ($n < n_0$ моля) проходит другой процесс: $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4$.

Расчетами установлено, что мольные доли восстановленного железа m во всех вариантах технологии с точностью до 0,001 находятся в линейных зависимостях от расходов восстановителя n по формулам $m = \frac{n - n_0}{n_1 - n_0}$. Это позволило записать единое балансовое уравнение процесса переработки:

$$(0{,}5Fe_2O_3 \text{ или } 0{,}333Fe_3O_4) + n\mathrm{CO}(H_2)_2 = m\mathrm{Fe} + 0{,}333(1-m)Fe_3O_4 + n[\eta_C\mathrm{CO} + (1-\eta_C-\eta_{CH})CO_2 + \eta_{CH}CH_4 + 2\eta_H H_2 + 2(1-\eta_H-\eta_{CH})H_2O], \quad (1)$$

где η_C, η_{CH} и η_H – температурно-зависимые характеристики «недожога» оксида углерода, метана и водорода соответственно. Формальные определения этих параметров: $\eta_C = \frac{CO}{CO + CO_2 + CH_4}$, η_{CH} = const и $\eta_H = \frac{H_2}{H_2 + H_2O + 2CH_4}$. Численные значения параметров указаны в таблице.

Таким образом, для достижения заданной степени металлизации железа m при переработке гематита и магнетита потребуются расходы восстановителя: $n = m(n_1 - n_0) + n_0 = 0{,}889mn_1 + 0{,}111$ и $n = mn_1$ моля соответственно.

На ОЭМК в настоящее время используется технология с параметрами, близкими к варианту 4 таблицы. Поэтому при средней величине металлизации железа 90 % (m = 0,9 моля) расход восстановителя составит n = 0,93 моля. Балансовое уравнение такого процесса будет иметь вид:

$$0{,}333Fe_3O_4 + 0{,}93\mathrm{CO}(H_2)_2 = 0{,}9\mathrm{Fe} + 0{,}0337Fe_3O_4 + 0{,}566\mathrm{CO} + 0{,}3641CO_2 + 1{,}023H_2 + 0{,}837H_2O. \quad (2)$$

Для переработки магнетита, имеющего молекулярную массу 232 г/моль, потребуется удельный расход природного газа $\frac{0{,}93 \cdot 22{,}4 \cdot 10^3}{0{,}333 \cdot 232} = 269$ м^3 на 1 т окатышей, что подтверждается опытом работы ОЭМК [4].

Выводы

Для описания химического процесса восстановления железа предложено балансовое уравнение этого процесса, устанавливающего связь количества восстановленного железа и состава образующегося колошникового газа от величины расхода восстановительного газа.

Список литературы

1. Ünal H., Turgut E., Atapek S., Alkan A. Direct reduction of ferrous oxides to form an iron-rich alternative charge material // High Temperature Materials and Processes. 2015. Vol. 34. No. 8. P. 751–756. https://doi.org/10.1515/htmp-2014-0125
2. Atsushi M., Uemura H., Sakaguchi T. MIDREX processes // Kobelco Technology Review. 2010. No. 29. P. 50–57.
3. Mouer A. Direct from MIDREX. 2nd Quarter. 2009. P. 3–9.
4. Процесс Мидрекс: производство губчатого железа. Электронный ресурс. URL: https://uas.su/books/srmp/511/razdel511.php
5. Трусов Б.Г. База данных и программный комплекс ТЕРРА, редакция 6.3 (электронный ресурс). М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013.

References

1. Ünal H., Turgut E., Atapek S., Alkan A. Direct reduction of ferrous oxides to form an iron-rich alternative charge material. *High Temperature Materials and Processes*. 2015, vol. 34, no. 8, pp. 751–756. https://doi.org/10.1515/htmp-2014-0125
2. Atsushi M., Uemura H., Sakaguchi T. MIDREX processes. *Kobelco Technology Review*. 2010, no. 29, pp. 50–57.
3. Mouer A. *Direct from MIDREX*. 2nd Quarter. 2009, pp. 3–9.
4. *MIDREX Process: Sponge Iron Production. Information Service*. Available at URL: https://uas.su/books/srmp/511/razdel511.php
5. Trusov B.G. *Database and Program Complex TERRA*, edition 6.3 [Electronic resource]. Moscow: Bauman STU, 2013. (In Russ.).

Сведения об авторах

Виктор Иванович Бердников, *к.т.н., доцент, старший научный сотрудник,* ООО Промышленная компания «Технология металлов»
E-mail: berdnikov-chel@mail.ru

Юрий Александрович Гудим, *д.т.н., профессор,* Южно-Уральский государственный университет

Information about the authors

Viktor I. Berdnikov, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Senior Researcher,* LLC Industrial Company "Technology of Metals"
E-mail: berdnikov-chel@mail.ru

Yurii A. Gudim, *Dr. Sci. (Eng.), Prof.,* South Ural State University

Поступила в редакцию 17.12.2020
После доработки 17.12.2020
Принята к публикации 16.04.2021

Received 17.12.2020
Revised 17.12.2020
Accepted 16.04.2021

Краткое сообщение
УДК 669:544.35:546.17:546.73
DOI 10.17073/0368-0797-2021-5-363-365

Вагнеровский параметр взаимодействия азота с кобальтом в жидких сплавах на основе никеля

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

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

Аннотация. Предложена простая теория термодинамических свойств жидких растворов азота в сплавах системы Ni–Co. Эта теория полностью аналогична теории для жидких растворов азота в сплавах системы Fe–Cr, предложенной авторами в 2019 г. Теория основана на решеточной модели растворов Ni–Co. Предполагается модельная решетка типа ГЦК. В узлах этой решетки располагаются атомы никеля и кобальта. Атомы азота располагаются в октаэдрических междоузлиях. Атом азота взаимодействует лишь с атомами металлов, находящимися в соседних с этим атомом узлах решетки. Это взаимодействие парное. Исходными для расчета являются значения констант закона Сивертса для растворимости азота в жидком никеле и в жидком кобальте. Результатом расчета является значение вагнеровского параметра взаимодействия в жидких сплавах на основе никеля при температуре 1873 К $\varepsilon_N^{Co} = -1{,}35$. Это значение хорошо согласуется с экспериментальными данными (Кованда и Шпайдель, 2003 г.).

Ключевые слова: термодинамика, растворы, азот, никель, кобальт, коэффициенты активности, вагнеровский параметр взаимодействия, лангенберговский параметр взаимодействия, закон Сивертса

Для цитирования: Большов Л.А., Корнейчук С.К., Большова Э.Л. Вагнеровский параметр взаимодействия азота с кобальтом в жидких сплавах на основе никеля // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 363–365. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-363-365

Short report

Wagner interaction coefficient between nitrogen and cobalt in liquid nickel-based alloys

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

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

Abstract. The report describes a simple theory of thermodynamic properties of nitrogen solutions in liquid Ni–Co alloys. This theory is completely analogous to the theory for liquid nitrogen solutions in alloys of the Fe–Cr system proposed previously by the authors in 2019. The theory is based on lattice model of the Ni–Co solutions. The model assumes FCC lattice. In the sites of this lattice are the atoms of Ni and Co. Nitrogen atoms are located in octahedral interstices. The nitrogen atom interacts only with the metal atoms located in the lattice sites neighbouring to it. This interaction is pairwise. The initial values for the calculation are the Sieverts law constants for nitrogen solubility of in liquid nickel and in liquid cobalt. The result of the calculation is the value of the Wagner interaction coefficient in liquid nickel-based alloys at 1873 K $\varepsilon_N^{Co} = -1{,}35$. This value is in good agreement with the experimental data (Kowanda and Speidel, 2003).

Keywords: thermodynamics, solutions, nitrogen, nickel, cobalt, activity coefficient, Wagner interaction coefficient, Langenberg interaction coefficient, Sieverts law

For citation: Bol'shov L.A., Korneichuk S.K., Bol'shova E.L. Wagner interaction coefficient between nitrogen and cobalt in liquid nickel-based alloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 5, pp. 363–365. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-363-365

Никель – основа важнейших жаропрочных сплавов, содержащих большое число легирующих элементов. Концентрация хрома и кобальта в этих сплавах больше концентрации других легирующих. Содержание азота в жаропрочных сплавах существенно влияет на их эксплуатационные характеристики. Поэтому растворимость азота в расплавах на основе никеля имеет практическое значение. Для расчета величины этой растворимости необходимо знать, как минимум, величину константы закона Сивертса для растворимости азота в жидком никеле и вагнеровские параметры взаимодействия азота с легирующими металлами в жидких сплавах на основе никеля. Экспериментальных работ, в которых измерен вагнеровский параметр взаимодействия азота с кобальтом в этих сплавах, немного. Поэтому целесообразно рассмотреть соответствующий вопрос теоретически.

Рассмотрим растворы азота в жидких сплавах системы Ni–Co. Концентрации компонентов Ni, Co и N в

этих сплавах, выраженные в мольных долях, обозначим как c_{Ni}, c_{Co} и c_N соответственно. Концентрации этих компонентов, выраженные в процентах по массе, обозначим как [% Ni], [% Co] и [% N]. Пусть a_N – термодинамическая активность азота в сплаве. Тогда $\gamma_N = \frac{a_N}{c_N}$ называется рациональным коэффициентом активности азота. Отношение $f_N = \frac{a_N}{[\%\ N]}$ назовем массово-процентным коэффициентом активности азота.

Введем термодинамические параметры взаимодействия первого порядка азота с кобальтом в жидких сплавах на основе никеля:

$$\varepsilon_N^{Co} = \frac{\partial \ln \gamma_N}{\partial c_{Co}} \text{ при } c_{Ni} \to 1;$$

$$e_N^{Co} = \frac{\partial \lg f_N}{\partial [\%\ Co]} \text{ при } [\%\ Ni] \to 100.$$

Параметры типа ε_N^{Co} часто называют вагнеровскими [1] параметрами взаимодействия. Аналогично, параметры типа e_N^{Co} можно назвать лангенберговскими параметрами взаимодействия. Между вагнеровскими и лангенберговскими параметрами взаимодействия установлено соотношение [2] типа:

$$\varepsilon_N^{Co} = 230{,}3\frac{A_{Co}}{A_{Ni}}e_N^{Co} + \frac{A_{Ni} - A_{Co}}{A_{Ni}}, \qquad (1)$$

где A_{Ni} и A_{Co} – атомные массы соответствующих элементов.

Растворимость азота в сплаве в процентах по массе обозначим как $[\%\ N]^*$. Для жидких сплавов Ni–Co при $P_{N_2} \le P_0$ имеет место закон Сивертса [3]:

$$[\%\ N]^* = K'\sqrt{\frac{P_{N_2}}{P_0}},$$

где P_{N_2} – парциальное давление азота в газовой фазе; P_0 – стандартное давление (P_0 = 1 атм ≈ 0,101 МПа); K' – константа закона Сивертса. Для растворимости азота в чистом никеле введем обозначение $K' = K'(Ni)$. Аналогично, для растворимости азота в жидком кобальте пусть $K' = K'(Co)$.

Пользуясь результатами работы [4], для рассматриваемой модели сплавов Ni–Co имеем:

$$K'(Co) = K'(Ni)\frac{A_{Ni}}{A_{Co}}\left(1 - \frac{1}{6}\varepsilon_N^{Co}\right)^6. \qquad (2)$$

В работе [5] приведен ряд экспериментальных значений величины $K'(Ni)$ при температуре 1873 К, установленных с 1959 по 2001 г. Среднее арифметическое этих значений составляет 0,0014 % (по массе). В работе [6] установлено экспериментальное значение величины $K'(Co)$ при той же температуре: $K'(Co) = 0{,}0047 \pm 0{,}0007$ % (по массе). В расчетах, проведенных в данной работе, использовано значение $K'(Co) = 0{,}0047$ % (по массе). Подставим значения $K'(Ni) = 0{,}0014$ % (по массе) и $K'(Co) = 0{,}0047$ % (по массе) в уравнение (2). Решим полученное уравнение относительно ε_N^{Co}. Решением будет значение $\varepsilon_N^{Co} = -1{,}35$. Подставим это значение в уравнение (1). Решением уравнения (1) будет $e_N^{Co} = -0{,}0058$. Это очень хорошо согласуется с экспериментальным результатом $e_N^{Co} = -0{,}0059$ [7], полученным для температуры 1823 К.

Выводы

Простейшая теория для растворов азота в жидких сплавах системы Ni–Co приводит к теоретическому значению вагнеровского параметра взаимодействия ε_N^{Co} в жидких сплавах на основе никеля $\varepsilon_N^{Co} = -1{,}35$ при температуре 1873 К, что соответствует значению лангенберговского параметра взаимодействия $e_N^{Co} = -0{,}005$. Это очень хорошо согласуется с экспериментальным результатом $e_N^{Co} = -0{,}0059$ [7], полученным для температуры 1823 К.

Список литературы / References

1. Вагнер К. Термодинамика сплавов. М.: Металлургиздат, 1957. 179 с.
2. 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.
3. 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
4. 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
5. Abdulrahman R.F., Hendry A. The solubility of nitrogen in liquid pure nickel // Metallurgical and Materials Transactions B. 2001. Vol. 32. No. 6. P. 1095–1101. http://doi.org/10.1007/s11663-001-0097-4

1. Wagner Carl. *Thermodynamics of Alloys*. Cambridge, Addison-Wesley Press, 1952, 162 p. (Russ. ed.: Wagner C. *Termodinamika splavov*. Moscow: Metallurgizdat, 1957, 179 p.).
2. 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.
3. Sieverts A. Zur Kenntnis der Okklusion und Diffusion von Gasen in Metalle. *Zeitschrift für physikalische Chemie*. 1907, vol. 60, no. 2, pp. 129–201. (In Germ.). https://doi.org/10.1515/zpch-1907-6009
4. 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
5. Abdulrahman R.F., Hendry A. The solubility of nitrogen in liquid pure nickel. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2001, vol. 32, no. 6, pp. 1095–1101. http://doi.org/10.1007/s11663-001-0097-4

6. Blossey K.G., Pehlke R.D. Solubility of nitrogen in liquid cobalt alloys // Transactions of the Metallurgical Society of AIME. 1966. Vol. 236. No. 1. P. 28–32.
7. Kowanda C., Speidel M.O. Solubility of nitrogen in liquid nickel and binary Ni–Xi alloys (Xi = Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co) under elevated pressure // Scripta Materialia. 2003. Vol. 48. No. 8. P. 1073–1078. https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00628-0

6. Blossey K.G., Pehlke R.D. Solubility of nitrogen in liquid cobalt alloys. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*. 1966, vol. 236, no. 1, pp. 28–32.
7. Kowanda C., Speidel M.O. Solubility of nitrogen in liquid nickel and binary Ni–Xi alloys (Xi = Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co) under elevated pressure. *Scripta Materialia*. 2003, vol. 48, no. 8, pp. 1073–1078. https://doi.org/10.1016/S1359-6462(02)00628-0

Сведения об авторах

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

Information about the authors

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
E-mail: labolshov@mail.ru

Поступила в редакцию 03.01.2021
После доработки 03.01.2021
Принята к публикации 16.04.2021

Received 03.01.2021
Revised 03.01.2021
Accepted 16.04.2021

Инновации в металлургическом промышленном и лабораторном оборудовании, технологиях и материалах / **Innovation in metallurgical industrial and laboratory equipment, technologies and materials**

Оригинальная статья
УДК 622.765.45 004.356.2
DOI 10.17073/0368-0797-2021-5-366-373

CC BY

Разработка конструкции и технологии изготовления импеллера флотационной машины на основе аддитивных технологий

Л. В. Седых [1], П. В. Борисов [1], А. Н. Пашков [1, 2], Н. В. Горбатюк [3], Р. Ю. Суркова [1], Ж. Х. Маматкулов [1]

[1] **Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»** (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)
[2] **АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина»** (Россия, 141190, Московская обл., Фрязино, ул. Вокзальная, 2а)
[3] **Академия строительства и архитектуры (Крымский феральный университет имени В.И. Вернадского)** (Россия, 295493, Республика Крым, Симферополь, ул. Киевская, 181)

Аннотация. Постоянное увеличение потребления черных, цветных, благородных и редких металлов в народном хозяйстве требует повышения эффективности добычи и обогащения полезных ископаемых. Одним из основных методов обогащения, применяемых в технологическом процессе переработки различных руд, считается пенная флотация. Приведено краткое описание этого процесса, проанализированы различные конструкции флотационных машин. Работа посвящена модернизации аэрационного узла флотационных машин конструкции «РИФ». Отмечено, что при проектировании таких машин эффективно используется модульный принцип компоновки агрегатов, который позволяет модернизировать отдельные узлы, повышая эффективность работы машины в целом. Основной деталью этого узла является самая сложная и быстро изнашиваемая деталь – импеллер. Проанализированы различные конструкции импеллеров и технологии их изготовления. Отмечено, что в существующих конструкциях флотационных машин импеллеры изготавливают из стали. Предложено заменить этот материал на полиуретан, который получил широкое распространение как конструкционный материал в связи с появлением аддитивных технологий при производстве различных деталей. Это материал имеет относительно невысокую стоимость и обладает повышенной сопротивляемостью износу. Сформулированы основные требования к важнейшим операциям технологического процесса изготовления импеллера. Для этого в системе трехмерного автоматизированного проектирования Компас разработана 3D-модель модернизированной конструкции импеллера. Предложена аддитивная технология послойного изготовления импеллера на 3D-принтере с использованием программы-слайсера Ultimaker Cura. Для изготовления импеллера предложенной конструкции из полиуретана разработана технология производства методом послойного наплавления Fused Deposition Modeling (FDM).

Ключевые слова: флотационная машина, аэрационный узел, импеллер, компьютерное моделирование, слайсер, управляющая программа, аддитивные технологии

Для цитирования: Седых Л.В., Борисов П.В., Пашков А.Н., Горбатюк Н.В., Суркова Р.Е., Маматкулов Ж.Х. Разработка конструкции и технологии изготовления импеллера флотационной машины на основе аддитивных технологий // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 366–373. *https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-366-373*

Original article

Development of flotation machine impeller on the base of additive technologies

L. V. Sedykh [1], P. V. Borisov [1], A. N. Pashkov [1, 2], N. V. Gorbatyuk [3], R. Yu. Surkova [1], Zh. Kh. Mamatkulov [1]

[1] **National University of Science and Technology “MISIS”** (MISIS) (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)
[2] **JSC “RPC “Istok” named after A.I. Shokin”** (2a Vokzal’naya Str., Fryazino, Moscow Region 141190, Russian Federation)
[3] **Academy of Construction and Architecture (V.I. Vernadsky Crimean Federal University)** (181 Kievskaya Str., Simferopol, Republic of Crimea 295493, Russian Federation)

Abstract. The constant increase in the consumption of ferrous, non-ferrous, precious and rare metals in the national economy requires an increase in the efficiency of minerals mining and processing. One of the main methods of enrichment used in the technological process of processing various ores is foam flotation. The authors provide a brief description of this process and analysis of various designs of flotation machines. The article is devoted to the modernization of the aeration unit of flotation machines with “RIF” design. It is noted that the design of such machines effectively uses the modular principle of assembly aggregates, which allows you to upgrade individual unit, increasing the efficiency of the machine as a whole. The main

part of this unit is an impeller – the most complex and fast – wearing part. The paper analyzes various designs of impellers and their manufacturing technologies. It is noted that in the existing designs of flotation machines, the impellers are made of steel. It is proposed to replace this material with polyurethane, which has become widely used as a structural material due to the emergence of additive technologies in the production of various parts. This material has a relatively low cost and has an increased resistance to wear. The article formulates the main requirements for the most important operations of the technological process of impeller manufacturing. For this purpose, a 3D model of the upgraded impeller design was developed in the SolidWorks 3D computer-aided design system. The authors propose an additive technology for layer-by-layer production of an impeller on a 3D printer using the Ultimaker Cura slicer program. For the manufacture of the proposed design of the impeller made of polyurethane, the production technology was developed by the method of layer-by-layer deposition method of Fused Deposition Modeling (FDM).

Keywords: flotation machine, aeration unit, impeller, computer simulation, slicer, control program, additive technology

For citation: Sedykh L.V., Borisov P.V., Pashkov A.N., Gorbatyuk N.V., Surkova R.E., Mamatkulov Zh.Kh. Development of flotation machine impeller on the base of additive technologies. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 5, pp. 366–373. (In Russ.).
https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-366-373

Введение

Одним из эффективных методов обогащения различных руд является флотация. В настоящее время наиболее распространен метод пенной флотации. С ее помощью во всем мире ежегодно обогащают более 1 млрд т горной массы и более 20 типов руд [1].

Принцип работы флотационной машины типа «РИФ» (рис. 1) заключается в следующем. Поступающий на обогащение материал в виде пульпы подается в отсеки-камеры приемного кармана машины. Затем, за счет гидростатического напора, поток пульпы последовательно проходит через несколько камер машины. В каждой камере *1* находится аэрационный узел *2* с импеллером *3*, вращение которому передается от привода *4* [2].

Важной конструктивной особенностью флотационных машин для обогащения руд является модульный принцип их компоновки. Он позволяет внедрять модифицированные узлы в существующие конструкции, что значительно упрощает не только ремонт, но и их усовершенствование [2 – 7].

Целью работы являлась модернизация конструкции импеллера аэрационного узла, входящего в пневмомеханическую флотационную машину типа «РИФ», для получения модели с высоким показателем аэрации и разработка процесса изготовления импеллера с использованием аддитивных технологий [8, 9].

Анализ конструкции модернизированного импеллера для аэрационного узла

На сегодняшний день существуют различные виды импеллеров аэрационных узлов пневмомеханических флотационных машин типа «РИФ». Каждый имеет свои преимущества и недостатки. Проведен анализ работ [2 – 7, 10 – 15], в которых рассматриваются тенденции модернизации технологического оборудования, в том числе импеллеров аэрационных узлов флотационных машин.

Рассмотрим основные недостатки импеллеров аэрационного узла, которые перечислены в источниках [10 – 15]:

– при подаче больших объемов сжатого воздуха замечается одностороннее «пробулькивание» воздуха, выходящего из нижней части аэратора;

– большие энергетические затраты на аэрацию пульпы;

– быстрый износ, срок службы составляет несколько месяцев.

В результате анализа было решено заменить конструкцию импеллера, предложенную авторами [15] (рис. 2, *а*), на модернизированную (рис. 2, *б*). Основное отличие предлагаемого импеллера аэрационного узла от известного [15] заключается в следующем:

– межлопаточная верхняя поверхность нижнего диска выполнена с наклоном к периферии импеллера под углом 33°42′;

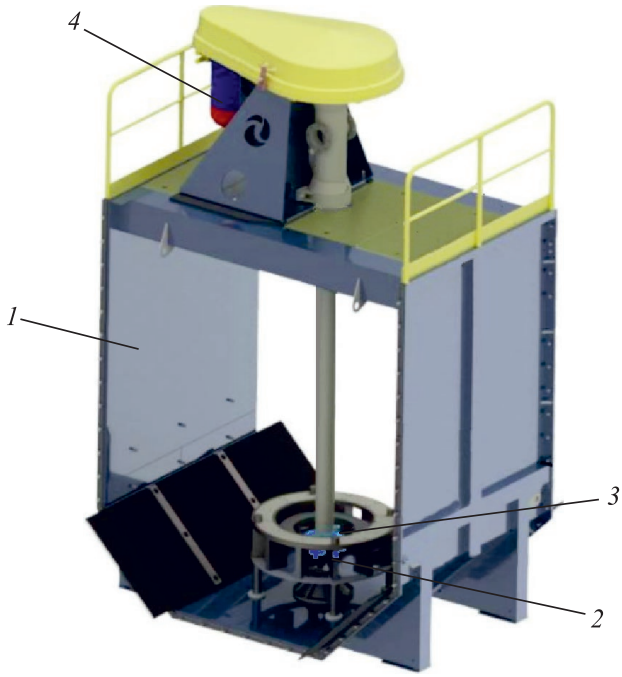


Рис. 1. Секция камеры флотационной машины с импеллером:
1 – корпус камеры; *2* – аэрационный узел с импеллером;
3 – импеллер; *4* – привод импеллера

Fig. 1. Chamber section of the flotation machine with an impeller:
1 – chamber body; *2* – aeration unit with an impeller;
3 – impeller; *4* – impeller drive

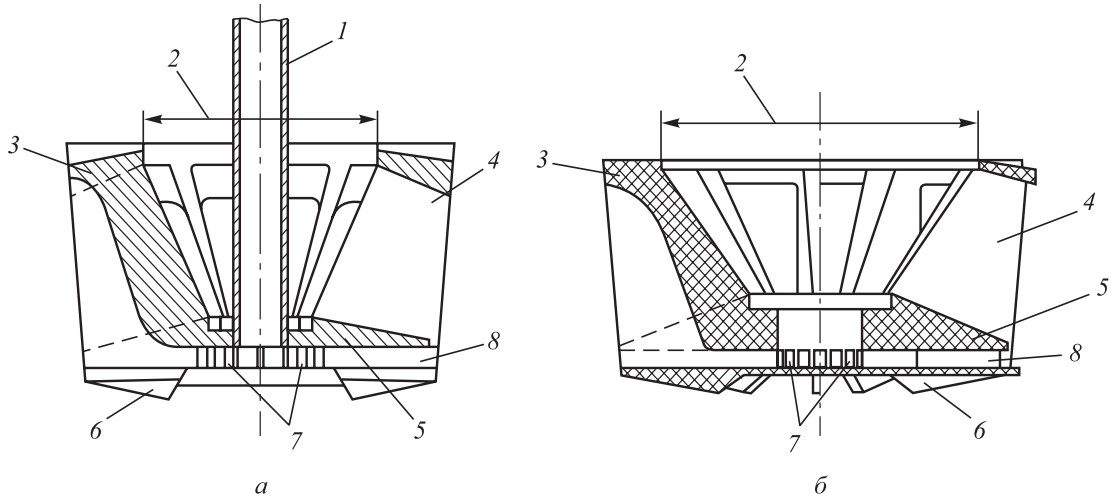


Рис. 2. Эскизы конструкции импеллера аэрационного узла: *а* – до модернизации, *б* – после:
1 – полый вал; *2* – отверстие; *3* – лопатки; *4* – щели; *5* – рифли; *6* – наклонные ребра; *7* – каналы; *8* – нижний диск

Fig. 2. Design sketches of the aeration unit impeller: *а* – before modernization, *б* – after modernization:
1 – hollow shaft; *2* – hole; *3* – blades; *4* – slots; *5* – riffles; *6* – inclined ribs; *7* – channels; *8* – lower disk

– предложено крепление импеллера к полому валу (патрубку) аэрационного узла (патрубок сделан из металла, а импеллер из полиуретана);

– в качества материала импеллера предложен полиуретан.

Обычно импеллеры изготавливают из металла с резиновой футеровкой. Полиуретан [16] обладает следующими основными свойствами:

– высокая износостойкость (в 3 раза больше, чем у резины);

– высокая упругость (возвращает начальную форму после деформации);

– сохранение формы при температурах от –50 до +140 °С;

– устойчивость к агрессивным средам.

Благодаря рассмотренным свойствам применение полиуретана увеличит срок службы импеллера по сравнению с изготовленными из металла или резиновых смесей. Это позволит снизить расходы на простои из-за ремонтных работ.

Многие известные инженерные решения имеют один важный недостаток – сложность изготовления с использованием старых технологий. На современном этапе в промышленности появилось много инновационных методов производства, которые позволяют не только изготавливать сложные изделия, но и проводить компьютерное моделирование процессов их обработки и работы узлов, в которые они входят [9, 17 – 23].

Импеллер аэрационного узла является сложной деталью, которую технологично производить с применением новых подходов к изготовлению. Наиболее производительными методами получения изделий данного типа являются послойная печать на 3D-принтерах и обработка заготовок на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). Оба вида оборудования используют управляющие программы для обеспечения автоматизированного процесса получения изделия.

Импеллер имеет большое количество лопаток, которые расположены с зазорами между верхним и нижним дисками. Поэтому его экономичнее производить методом послойного добавления материала, чем удалением с заготовки в виде стружки, как на металлорежущих станках с ЧПУ.

Разработка процесса изготовления импеллера

Изготовление детали с использованием аддитивных технологий начинается с создания 3D-модели в соответствии с размерами и геометрическими особенностями конструкции при помощи любой системы трехмерного автоматизированного проектирования (САПР). В работе 3D-модель импеллера создана в Компас (рис. 3).

Для изготовления импеллера предложенной конструкции из полиуретана была выбрана технология производства методом послойного наплавления Fused Deposition Modeling (FDM), которая имеет много достоинств:

– занимает лидирующее место, по сравнению с другими методами 3D-печати благодаря простоте использования, доступности и достаточной легкости освоения программного обеспечения, невысокой цене 3D-принтеров, используемых для FDM [24];

– широкий выбор прочных, термостойких, износостойких пластиков, благодаря чему можно подобрать необходимый расходный материал для конкретного изделия в соответствии с заданными свойствами и желаемого цвета;

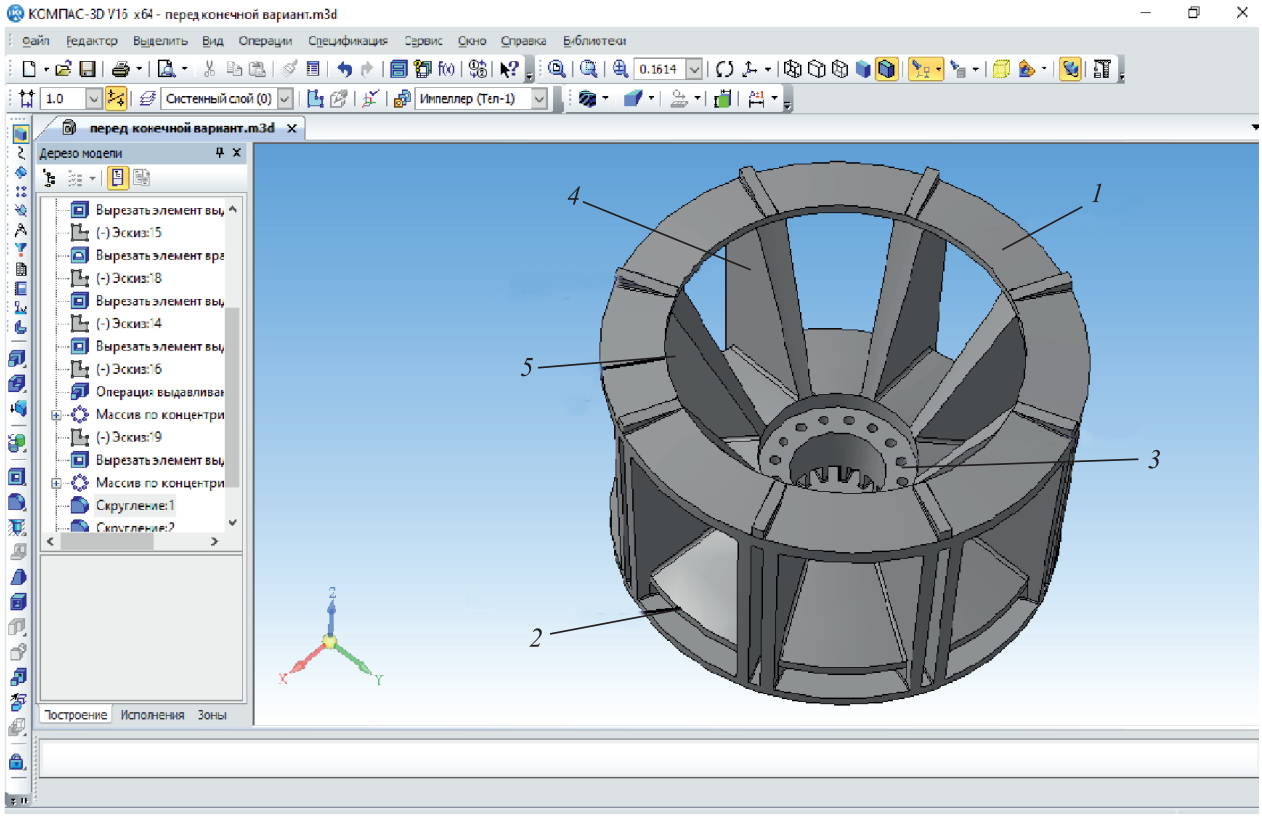


Рис. 3. Конструктивные особенности импеллера после модернизации:
1 – верхний диск; *2* – нижний диск; *3* – отверстия для закрепления полого вала; *4* – пластинчатые лопатки; *5* – центральное отверстие

Fig. 3. Design features of the impeller after modernization:
1 – upper disc; *2* – lower disc; *3* – holes for fixing the hollow shaft; *4* – plate blades; *5* – central hole

– высокая гибкость настройки и скорость печати позволяют быстро производить крупные партии изделий, в том числе габаритных деталей сложной формы;

– технология FDM является относительно безотходным методом, почти не требующим дополнительной обработки на металлорежущих станках.

Технология моделирования методом послойного наплавления требует подготовки для 3D-печати. Перед печатью на принтере 3D-модель импеллера (см. рис. 3), экспортированную в STL файл, следует преобразовать в специальный формат, используя программу, которая называется слайсер [20]. Слайсер разбивает цифровую модель на слои и выдает бинарный код (G-code), понятный для 3D-принтера. Полученный код можно записать на USB-носитель или непосредственно воспроизводить от персонального компьютера. Для перевода 3D-модели импеллера в G-code использована программа-слайсер Cura 3D [21]. Технологический процесс послойного наплавления FDM производится на 3D-принтере Ultimaker (рис. 4).

Процесс изготовления импеллера *1* осуществляется следующим образом: материалы для печати и поддержки *2* разматываются с катушки и заправляются в печатную головку двойной экструзии *3*,

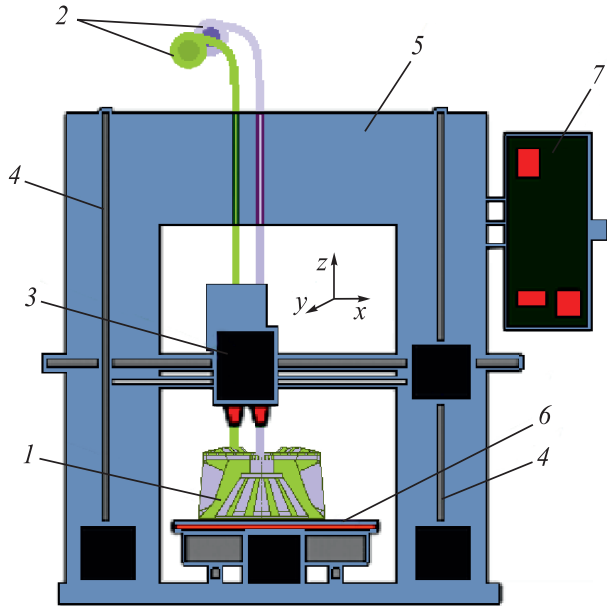


Рис. 4. Конструктивная схема 3D-принтера:
1 – импеллер; *2* – материалы для печати;
3 – печатная головка с экструдерами; *4* – направляющие;
5 – корпус принтера; *6* – рабочий стол; *7* – устройство ЧПУ

Fig. 4. Design diagram of a 3D printer:
1 – impeller; *2* – printing materials; *3* – printhead with extruders;
4 – guides; *5* – printer body; *6* – desktop; *7* – CNC device

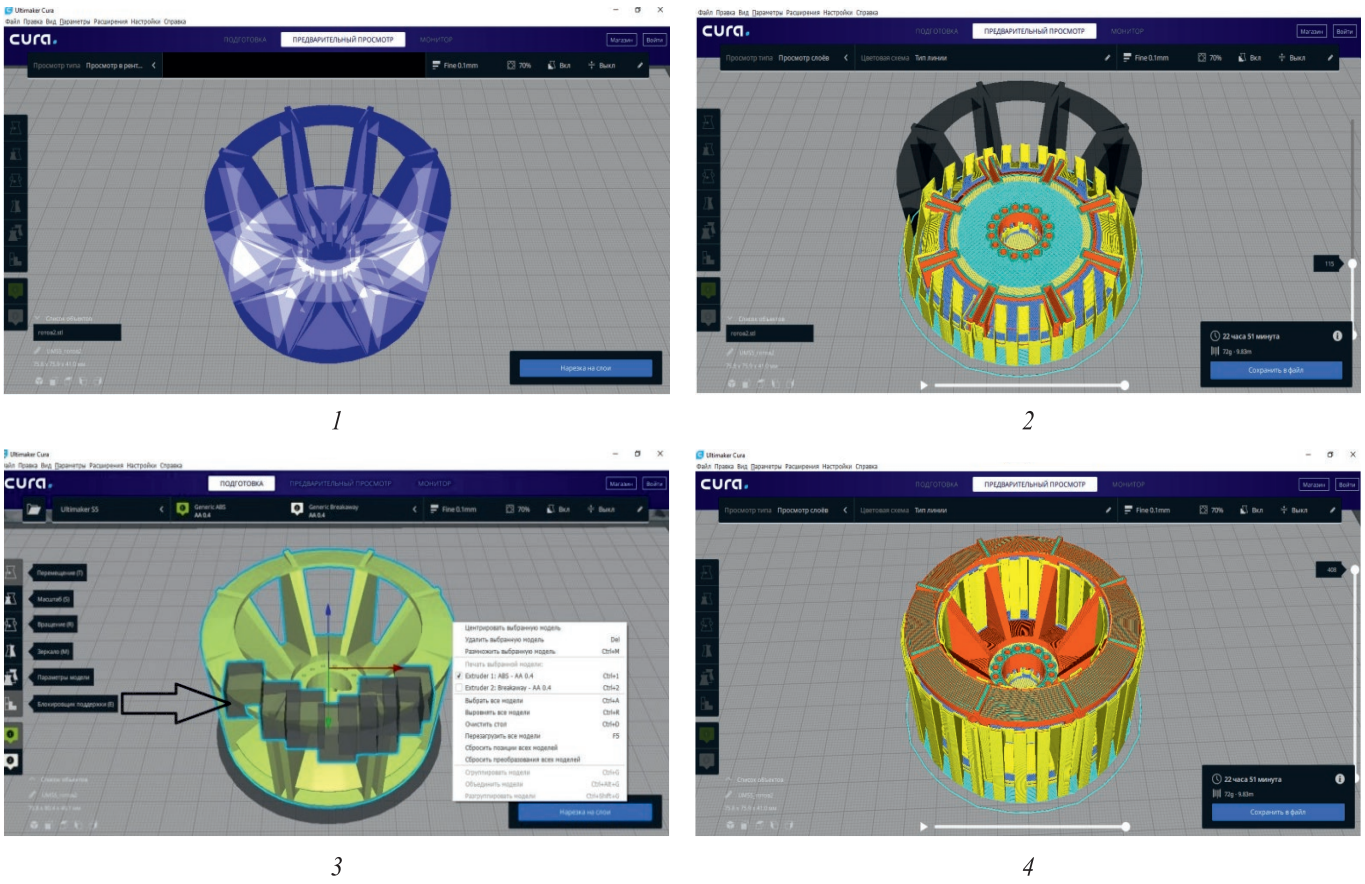


Рис. 5. Этапы компьютерного моделирования импеллера в слайсере Ultimaker Cura:
1 – просмотр 3D-модели в Cura; *2* – нарезание 3D-модели на слои; *3* – настройка программы; *4* – создание файла G-code с помощью Cura

Fig. 5. Stages of the impeller computer simulation in the Ultimaker Cura slicer:
1 – viewing the 3D model in Cura; *2* – cutting the 3D model into layers; *3* – configuring the program; *4* – G-code files using Cura

которая плавно перемещается по вертикальным направляющим *4* корпуса принтера *5*. Далее разогретые в печатной головке материалы поступают через два экструдера и укладываются на рабочий стол *6*, формируя 3D деталь. Все движения осуществляются от устройства ЧПУ *7*.

Процесс послойного наплавления по технологии FDM осуществляется снизу-вверх по координатам *x*, *y* и *z* (см. рис. 4). Импеллер имеет выступающие структуры, при моделировании которых необходимо добавлять опорные конструкции, поэтому используются нити из ПВА-пластика (поливинилацетата) для поддержки нависающих частей детали. ПВА-пластик имеет важную особенность – он растворяется в воде, что позволяет производить детали без последующей механической обработки на металлорежущих станках.

На рис. 5 представлены основные этапы компьютерного моделирования импеллера в слайсере Ultimaker Cura:

– загрузка 3D-модели в слайсер и контроль внутренней структуры проектируемого импеллера, при обнаружении проблем модель импеллера редактируется;

– после задания всех параметров, по команде осуществляется нарезание 3D-модели на слои, эта функция позволяет увидеть, в каком слое возникает проблема, при этом можно отредактировать G-code, например, увеличить поток, высоту слоя, скорость вращения импеллера;

– для получения детали заданной точности после ее построения на 3D-принтере необходимо задать правильные настройки, панель настроек программы делится на две части: настройка принтера и настройка печати.

– после задания всех настроек осуществляется создание файла G-code с помощью Cura, после этого полученный G-code отправляется на 3D-принтер.

Выводы

В работе представлен импеллер и способ его изготовления на основе аддитивной технологии послойного наплавления FDM.

Получена компьютерная модель послойного построения импеллера, который используется для реконструкции аэрационного узла пневмомеханической флотационной машины типа «РИФ». Для создания им-

пеллера в 3D среде использовалась программа-слайсер Ultimaker Cura для 3D-принтеров. Технологию послойного наплавления FDM можно применить не только для конкретного импеллера, но и для ремонта других видов импеллеров аэрационных узлов.

Перспектива применения 3D-принтеров экономически очевидна, так как существенно ускоряется процесс изготовления новых деталей. Уменьшаются риски и ошибки проектирования, увеличивается эффективность производства.

Список литературы / References

1. Бухоров Ш.Б., Қодиров Х.И. Абдикамалова А.Б. Эшметов И.Д. Значения флотационного процесса, исследование флотационных реагентов и механизмов их действия на поверхности раздела фаз // UNIVERSUM: Химия и биология: Электронный научный журнал. 2020. № 9(75). Режим доступа: URL: https://7universum.com/ru/nature/archive/item/10620 (дата обращения: 07.05.2021).
2. Зимин А.В. ЗАО НПО «РИВС» – итоги и достижения // Горный журнал. 2012. № 11. С. 4–5.
3. Fayed H., Ragab S. Numerical simulations of two-phase flow in a self-aerated flotation machine and kinetics modeling // Minerals. 2015. Vol. 5. No. 2. P. 164–188. https://doi.org/10.3390/min5020164
4. Gorain B.K., Franzidis J.P., Manlapig E.V. Flotation cell design: application of fundamental principles // Encyclopedia of Separation Science. Vol. II. Academic Press, 2000. P. 1502–1511.
5. Gorain B. Developing solutions to complex flotation problems // Proceedings of the 34th Canadian Mineral Processors Conf. Ottawa, January 22–24, 2013. P. 293–312.
6. Nelson M.G., Lelinski D., Gronstrand S. Design and operation of mechanical flotation machines // Recent Advances in Mineral Processing Plant Design / D. Malhotra, P. R. Taylor, E. Spiller, M. LeVier eds. Englewood, CO: SME, 2009. P. 168–189.
7. Bellini A., Guceri S. Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling // Rapid Prototyping Journal. 2003. Vol. 9. No. 4. P. 252–264. https://doi.org/10.1108/13552540310489631
8. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении. Режим доступа: https://elib.spbstu.ru/dl/2/3548.pdf/download/3548.pdf (дата обращения: 07.05.2021).
9. Sedykh L.V., Albul S.V., Efremov D.B., Sukhorukova M.A. Application of additive technologies for manufacturing a wear-resistant steel pipe outlet // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 971. Article 022002. http://doi.org/10.1088/1757-899X/971/2/022002
10. Emer C., Jameson G.J. Aspects of flotation in a fluidized bed // 26th Int. Mineral Processing Congress (IMPC 2012): Conf. Proceedings. New Delhi, India, 24–28 September 2012. P. 2271–2278.
11. Jameson G.J. New directions in flotation machine design // Mineral Engineering. 2010. No. 23. P. 835–841. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.04.001
12. Пат. 2158186 РФ. Аэратор / Зимин А.В., Шульц П.П.; заявл. 04.25.2000; опубл. 27.10.2000. Бюл. № 30.
13. Пат. 2225263C2 РФ. Аэрационный узел флотационной машины / Гладышев А.М., Токарев Н.В.; заявл. 20.11.2003; опубл. 10.03.2004. Бюл. № 7.
14. Пат. 2423186 РФ. Аэрационный узел / В.И. Журавлев, Д.В. Шехирев, А.М. Думов, Н.В. Кудрявцев, А.В. Панькин; заявл. 28.05.2009; опубл. 10.07.2011. Бюл. № 19.
15. Пат. 1789279 СССР. Импеллер флотационной машины / Шульц П.П., Лякушин С.Д., Фомин А.М.; заявл. 11.04.1989; опубл. 23.01.1993. Бюл. № 3, 4.

1. Bukhorov Sh.B., Qodirov Kh.I. Abdikamalova A.B. Eshmetov I.D. Importance of the flotation process, study of flotation reagents and mechanisms of their action on the surface of the phase section. *UNIVERSUM: khimiya i biologiya: elektron. nauchn. zhurn*. 2020, no. 9 (75). Available at URL: https://7universum.com/ru/nature/archive/item/10620 (Accessed: 07.05.2021). (In Russ.).
2. Zimin A.V. Scientific and Production Association “RIVS” JSC – results and achievements. *Non-ferrous Metals*. 2013, no. 1, pp. 3–4.
3. Fayed H., Ragab S. Numerical simulations of two-phase flow in a self-aerated flotation machine and kinetics modeling. *Minerals*. 2015, vol. 5, no. 2, pp. 164–188. https://doi.org/10.3390/min5020164
4. Gorain B.K., Franzidis J.P., Manlapig E.V. Flotation cell design: Application of fundamental principles. In: *Encyclopedia of Separation Science.* Vol. II. Academic Press, 2000, pp. 1502–1511.
5. Gorain B. Developing solutions to complex flotation problems. In: *Proceedings of the 34th Canadian Mineral Processors Conf. Ottawa, January 22–24, 2013*, pp. 293–312.
6. Nelson M.G., Lelinski D., Gronstrand S. Design and operation of mechanical flotation machines. In: *Recent Advances in Mineral Processing Plant Design*. Malhotra D., Taylor P.R., Spiller E., LeVier M. eds. Englewood, CO: SME, 2009, pp. 168–189
7. Bellini A., Guceri S. Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*. 2003, vol. 9, no. 4, pp. 252–264. https://doi.org/10.1108/13552540310489631
8. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylina I.N. *Additive Technologies in Mechanical Engineering*. Available at URL: https://elib.spbstu.ru/dl/2/3548.pdf/download/3548.pdf (Accessed: 19.01.2021). (In Russ.).
9. Sedykh L.V., Albul S.V., Efremov D.B., Sukhorukova M.A. Application of additive technologies for manufacturing a wear-resistant steel pipe outlet. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 971, article 022002. http://doi.org/10.1088/1757-899X/971/2/022002
10. Emer C., Jameson G.J. Aspects of flotation in a fluidized bed. *26th Int. Mineral Processing Congress (IMPC 2012): Conf. Proceedings. New Delhi, India, 24-28 September 2012*, pp. 2271–2278.
11. Jameson G.J. New directions in flotation machine design. *Mineral Engineering*. 2010, no. 23, pp. 835–841. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.04.001
12. Zimin A.V., Shul’ts P.P. *Aeration tower*. Patent RF no. 2158186. *Bulleten’ izobretenii*. 2000, no. 30. (In Russ.).
13. Gladyshev A.M., Tokarev N.V. *Aeration unit of flotation machine*. Patent RF no. 2225263C2. *Bulleten’ izobretenii*. 2004, no. 7. (In Russ.).
14. Zhuravlev V.I., Shekhirev D.V., Dumov A.M., Kudryavtsev N.V., Pan’kin A.V. *Aeration unit*. Patent RF no. 2423186. *Bulleten’ izobretenii*. 2011, no. 19. (In Russ.).
15. Shul’ts P.P., Lyakushin S.D., Fomin A.M. *Impeller of flotation machine*. Patent USSR no. 1789279. *Bulleten’ izobretenii*. 1993, no. 3, 4. (In Russ.).

16. ГОСТ 34376.1-2017. Пластмассы. Термопластичные полиуретаны для формирования и экструзии. Введен 2018-06-01. М.: Изд-во стандартов, 2018. 11 с.
17. Naumova M.G., Morozova I.G., Aliev K.B. Creating a project for modernizing the feeding balls device to a ball mill using 3D modeling // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 971. No. 5. Article 052025. https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/5/052025
18. Gerasimova A., Gorbatyuk S., Devyatiarova V. Application of gas-thermal coatings on low-alloyed steel surfaces // Solid State Phenomena. 2018. Vol. 284. P. 1284–1290. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.1284
19. Снитко С.А., Яковченко А.В. Влияние режима осевого обжатия на разнотолщинность обода колесной заготовки на начальной стадии ее прокатки // Металлург. 2017. № 5. С. 46–51.
20. Albagachiev A.Y., Keropyan A.M., Gerasimova A.A., Kobelev O.A. Determination of rational friction temperature in lengthwise rolling // CIS Iron and Steel Review. 2020. Vol. 19. P. 33–36. https://doi.org/10.17580/cisisr.2020.01.07
21. Валиуллин И.И., Кобелев О.А., Наумова М.Г., Морозова И.Г., Пашков А.Н., Наговицын В.А., Голощапов К.В. Применение дискретного двухрядного скребкового очистителя – эффективный способ очистки ленточных конвейеров для перемещения сыпучих материалов // Металлург. 2020. № 12. С. 89–93.
22. Low-cost 3D Printing for Science, Education & Sustainable Development. Режим доступа: https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.410.790&rep=rep1&type=pdf (дата обращения 07.05.2021).
23. Software Ultimaker. Режим доступа: https://ultimaker.com/software (дата обращения 07.05.2021).
24. Учебник по Cura 3D – как пользоваться программой-слайсером Cura. Режим доступа: https://3dpt.ru/blogs/support/cura (дата обращения 07.05.2021).

16. *GOST 34376.1-2017. Plastics. Thermoplastic polyurethanes for forming and extrusion: entered 2018-06-01*. Moscow: Izd-vo standartov, 2018, 11 p. (In Russ.).
17. Naumova M.G., Morozova I.G., Aliev K.B. Creating a project for modernizing the feeding balls device to a ball mill using 3D modeling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 971, no. 5, article 052025. https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/5/052025
18. Gerasimova A., Gorbatyuk S., Devyatiarova V. Application of gas-thermal coatings on low-alloyed steel surfaces. *Solid State Phenomena*. 2018, vol. 284, pp. 1284–1290. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.284.1284
19. Snitko S.A., Yakovchenko A.V. Influence of the axial reduction conditions on the variation in the thickness of a wheel rim at the initial stage of rolling. *Metallurgist*. 2017, vol. 61, no. 5-6, pp. 387–393. https://doi.org/10.1007/s11015-017-0505-x
20. Albagachiev A.Y., Keropyan A.M., Gerasimova A.A., Kobelev O.A. Determination of rational friction temperature in lengthwise rolling. *CIS Iron and Steel Review*. 2020, vol. 19, pp. 33–36. https://doi.org/10.17580/cisisr.2020.01.07
21. Valiullin I.I., Kobelev O.A., Naumova M.G., Morozova I.G., Pashkov A.N., Nagovitsyn V.A., Goloshchapov K.V. Application of a discrete double-row scraper cleaner as an efficient procedure of cleaning of belt conveyors aimed at transporting bulk materials. *Metallurgist*. 2021, vol. 64, no. 11-12, pp. 1340–1346. https://doi.org/10.1007/s11015-021-01124-x
22. *Low-cost 3D Printing for Science, Education & Sustainable Development*. Available at URL: https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.410.790&rep=rep1&type=pdf (Accessed: 07.05.2021).
23. *Software Ultimaker*. Available at URL: https://ultimaker.com/software (Accessed: 07.05.2021).
24. *Cura 3D Tutorial – How to Use the Cura Slicer Program*. Available at URL: https://3dpt.ru/blogs/support/cura (Accessed: 07.05.2021). (In Russ.).

Сведения об авторах / Information about the authors

Лариса Владимировна Седых, *доцент кафедры «Инжиниринг технологического оборудования»,* Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
E-mail: lvsedykh@mail.ru

Павел Валерьевич Борисов, *аспирант кафедры «Инжиниринг технологического оборудования»,* Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
E-mail: pborisov91@mail.ru

Алексей Николаевич Пашков, *к.т.н., доцент кафедры «Инжиниринг технологического оборудования»,* Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», *главный технолог,* АО «НПП «Исток» им. А.И. Шокина»

Наталья Владимировна Горбатюк, *к.г.-м.н., доцент,* Академия строительства и архитектуры (Крымский феральный университет имени В.И. Вернадского)

Регина Юрьевна Суркова, *аспирант кафедры «Инжиниринг технологического оборудования»,* Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
E-mail: regina_yu@mail.ru

Жамшид Хусанбой угли Маматкулов, *студент кафедры «Инжиниринг технологического оборудования»,* Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Larisa V. Sedykh, *Assist. Prof. of the Chair "Engineering of Technological Equipment",* National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS)
E-mail: lvsedykh@mail.ru

Pavel V. Borisov, *Postgraduate of the Chair "Engineering of Technological Equipment",* National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS)
E-mail: pborisov91@mail.ru

Aleksei N. Pashkov, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Engineering of Technological Equipment",* National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS), *Chief Technologist,* JSC "RPC "Istok" named after A.I. Shokin"

Natal'ya V. Gorbatyuk, *Cand. Sci. (Geol.-Mineralogical), Assist. Prof.,* Academy of Construction and Architecture (V.I. Vernadsky Crimean Federal University)

Regina Yu. Surkova, *Postgraduate of the Chair "Engineering of Technological Equipment",* National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS)
E-mail: regina_yu@mail.ru

Zhamshid Kh. Mamatkulov, *Student of the Chair "Engineering of Technological Equipment",* National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS)

Вклад авторов:

Л.В. Седых – идея работы, научное руководство.
П.В. Борисов – поиск и анализ опубликованных источников, в которых рассматриваются тенденции модернизации импеллеров аэрационных узлов флотационных машин.
А.Н. Пашков – формирование цели и задачи исследования, подготовка текста, корректировка выводов.
Н.В. Горбатюк – анализ результатов исследований, формирование выводов, окончательное редактирование текста.
Р.Ю. Суркова – создание 3D-модели и чертежа в соответствии с размерами и геометрическими особенностями конструкции при помощи программного продукта в SolidWorks.
Ж.Х. Маматкулов – компьютерное моделирование импеллера в слайсере Ultimaker.

Поступила в редакцию 19.02.2021
После доработки 24.04.2021
Принята к публикации 16.04.2021

Received 19.02.2021
Revised 24.04.2021
Accepted 16.04.2021

Оригинальная статья
УДК 621.78.013
DOI 10.17073/0368-0797-2021-5-374-381

Статистическое моделирование температурных режимов работы нагревательных печей листовых станов горячей прокатки

М. Ж. Богатова, С. И. Чибизова

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

Аннотация. В статье предложен способ совершенствования тепловой работы нагревательных печей с шагающими балками станов горячей прокатки при помощи статистической математической модели нагрева металла. Объектом исследования является тепловая работа методической печи с шагающими балками для нагрева слябов перед прокаткой. Предметом исследования – статистическое моделирование нагрева металла в печи данного типа. Создание статистической математической модели основано на отборе факторов, построении регрессионной модели, корреляционном анализе и оценке значимости переменных, построении регрессионной модели с учетом скорректированных факторов, получении уравнений регрессии. На базе результатов, полученных в ходе проведения 15 автоматизированных направленных промышленных экспериментов на методических печах станов горячей прокатки российских металлургических предприятий, разработана статистическая модель, описывающая с допустимой точностью процесс нагрева стальных заготовок. Проведена адаптация статистической модели с использованием результатов промышленных экспериментов. Приведены графики сравнения реальных температурных значений и температур, рассчитанных на основании штатной математической и разработанной статистической модели для одного из экспериментов. Проведен расчет погрешностей созданной модели. Сформулированы основные выводы, базирующиеся на результатах проделанного исследования. Впервые в металлургической практике разработана статистическая модель, описывающая процесс нагрева металла в пятизонной методической печи листового стана горячей прокатки с восемью нагревательными подзонами. Поскольку функция регрессии определена, интерпретирована и обоснована, и оценка точности регрессионного анализа соответствует требованиям, можно считать, что построенная модель и прогнозные значения обладают достаточной надежностью.

Ключевые слова: математическая модель, статистическая модель, направленный промышленный эксперимент, нагревательная печь с шагающими балками, система мониторинга, температурный режим, совершенствование тепловой работы

Для цитирования: Богатова М.Ж., Чибизова С.И. Статистическое моделирование температурных режимов работы нагревательных печей листовых станов горячей прокатки // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 374–381.
https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-374-381

Original article

Statistical modeling of temperature operating modes of heating furnaces for hot strip mills

M. Zh. Bogatova, S. I. Chibizova

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

Abstract. The article provides a method of mathematical modeling to improve temperature operating modes of heating furnaces for hot strip mills. The object of the research is the thermal operation of a continuous walking beam furnace for heating slabs before rolling. The subject of the research is statistical modeling of metal heating in furnaces of this type. The creation of a statistical model consists of factors selection, construction of regression model, correlation analysis and assessment of the variables significance, adjustment of factors and obtaining regression equations. The main part of the research refers to a statistical model based on a comprehensive analysis. This model is based on the results of 15 automated industrial experiments on Russian heating furnaces of hot strip mills and describes the heating process in walking-beam furnace with acceptable accuracy. The adaptation of the statistical model and error calculation has been carried out. The article contains graphs comparing real temperatures and temperatures calculated on the basis of mathematical and statistical models for one of the experiments. The main conclusions are formulated based on the results of the research done. For the first time in metallurgical practice, a statistical model has been developed that describes the process of metal heating in a five-zone continuous furnace with eight heating subzones. Since the regression function is defined, interpreted and justified, and the assessment of the accuracy of the regression analysis meets the requirements, it can be assumed that the model and predicted values have sufficient reliability.

Keywords: mathematical model, statistical model, directed industrial experiment, walking-beam heating furnace, monitoring system, temperature mode, thermal operation improvement

For citation: Bogatova M.Zh., Chibizova S.I. Statistical modeling of temperature operating modes of heating furnaces for hot strip mills. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 5, pp. 374–381. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-374-381

Введение

Черная металлургия в России имеет существенные резервы снижения затрат основных производственных ресурсов за счет повышения энергоэффективности металлургических печных агрегатов, которые являются важнейшим и наиболее энергоемким видом отраслевого технологического оборудования [1 – 7].

В современном мире большая часть выплавляемой стали обрабатывается на станах горячей прокатки, эффективность функционирования которых определяет конечное качество и энергоэффективность производства горячекатаного металла, в первую очередь листовой продукции, доля которой составляет около 70 % всего выпуска готового проката.

Температура металла – один из основных параметров технологического процесса нагрева в печах. В зависимости от того, насколько правильно выбран температурный режим нагрева слябов, отсутствует ли окалина на поверхности сляба, зависит качество получаемого проката. Кроме того, на нагрев слябов уходит большое количество топлива (природного, коксового и доменного газов), нерациональный расход которого приводит к повышению себестоимости продукции. Принимая во внимание масштабы производства проката, даже при небольшом снижении расхода топлива и угара металла повышение точности контроля температуры металла приводит к существенному экономическому эффекту. Данный факт является важнейшим стимулом для исследования и разработки новых и модернизации ранее известных методов контроля температуры металла в различных нагревательных печах. Дальнейшее совершенствование тепловой работы нагревательных печей, улучшение их эксплуатационных показателей, является существенным резервом повышения производительности, экономичности и качества готового проката, т. е. всего прокатного производства в целом.

Снижение энергозатрат и повышение качества нагрева металла напрямую связано с наличием и эффективностью автоматических систем управления тепловой работой агрегата.

Математические модели нагрева [8 – 14], как правило, аналитические, на основании которых ведется управление печью, нуждаются в периодической корректировке ввиду изменения значений настроечных коэффициентов.

Поиск оптимальных тепловых режимов путем проведения теплотехнических испытаний является главным методом совершенствования технологии нагрева металла в методических печах. Трудоемкость процесса обусловлена ограниченностью информации о процессе внутри печи, а выводы, которые формулируются на базе полученных результатов, зачастую не всегда дают адекватное представление о реальной картине процесса нагрева.

Проходные методические печи являются высокопроизводительными, непрерывными агрегатами, обеспечивающими нагрев под прокатку до заданной температуры стальных заготовок квадратного, прямоугольного или круглого сечения различных марок сталей. Тепловые и температурные процессы, которые происходят внутри рабочего пространства данных печей, весьма многообразны и сложны для изучения. Зачастую во время математического описания, моделирования и исследования теплообмена в нагревательных печах возникают значительные трудности. Благодаря высокому развитию современных численных методов и компьютерных технологий появляется возможность изучать практически любую представляющую интерес задачу, а также создавать точную математическую модель исследуемого объекта [15, 16].

Внедрение автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) нагрева, а также применение расчетов на ЭВМ в качестве меры по улучшению нагрева металла в методических печах требует создания адекватных математических моделей, которые бы могли определять тепловое состояние металла в течение всего процесса нагрева.

Разработка статистической модели процесса нагрева сляба и последующая адаптация модели по результатам эксперимента в методической нагревательной печи имеет важное теоретическое и практическое значение, так как благодаря такой модели появляется возможность выбора оптимальных условий для нагрева той или иной стальной заготовки на базе известных и контролируемых параметров работы агрегата.

Работа направлена на совершенствование функционирования нагревательных печей с шагающими балками на основе комплексного направленного исследования температурных режимов нагрева металла при помощи статистической модели нагрева. Модель создана для пятизонной методической печи листового стана горячей прокатки с восемью нагревательными подзонами. В печи выделяются: неотапливаемая методическая зона (1), отапливаемые сверху и снизу зоны предварительного нагрева (2.1, 2.2), две зоны нагрева (3.3, 3.4, 4.5, 4.6) и томильная (5.7, 5.8) (рис. 1).

Основные задачи, которые решались по ходу исследования:

– анализ данных тепловой работы нагревательных печей;

– изучение особенностей конструкции методических печей с пятью зонами (восемью нагревательными подзонами);

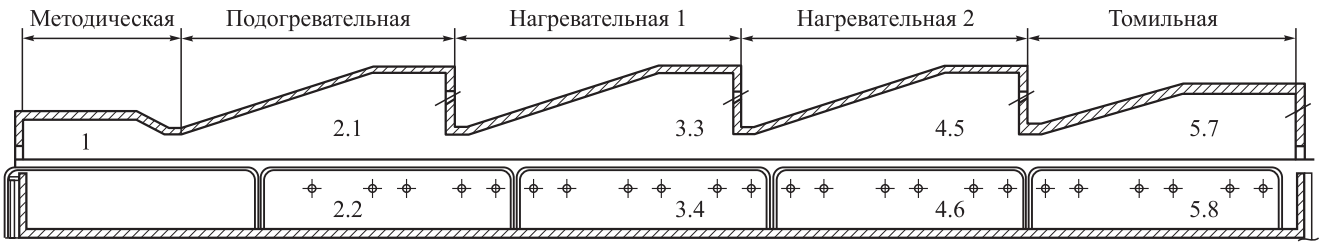


Рис. 1. Схема методической печи листового стана горячей прокатки с восемью нагревательными подзонами

Fig. 1 Scheme of continuous furnace of hot strip mill with eight heating subzones

– рассмотрение основ статистического моделирования тепловой работы нагревательных печей;

– анализ данных, полученных в результате промышленных экспериментов, проведенных на нагревательных печах станов горячей прокатки российских предприятий;

– разработка способов и средств определения температуры металла в нагревательных методических печах при помощи статистического моделирования при использовании ограниченного набора исходных данных;

– создание статистической модели процесса нагрева сляба в методической печи в виде уравнений регрессии, которые связывают конечную температуру верха, середины и низа сляба с параметрами нагрева и параметрами металла, которые практически контролируются в технологическом процессе на листовом стане горячей прокатки;

– адаптация статистической модели на основании результатов промышленных экспериментов на исследуемых печах [17, 18].

Описание методики исследования

Изучать тепловую работу нагревательных печей можно при использовании автономного регистратора температур. Основная концепция данного прибора заключается в проведении ряда измерений короткими гибкими кабельными термоэлектрическими преобразователями, в то время как регистрирующий прибор, фиксирующий результаты измерений, располагается рядом с объектом измерений (либо на опытной заготовке, либо на соседней). При этом прибор заключают в контейнер-термостат, который обеспечивает защиту регистратора от действия высоких температур. Для проведения многократного оперативного изучения температурного режима нагрева металла и анализа температурных режимов работы печи была разработана методика и создан аппаратно-программный комплекс автономной регистрации на базе аппаратуры, поставляемой фирмой Phoenix TM (рис. 2) [19].

Система состоит из автономного регистратора данных, набора термопар (6 – 20 шт.), специального теплозащитного контейнера, системы передачи данных по радиотелеметрическому каналу и компьютерного интерфейса, который позволяет получать и отображать значения реального профиля температур внутри печи, распределение температуры по сечению сляба в процессе его нагрева.

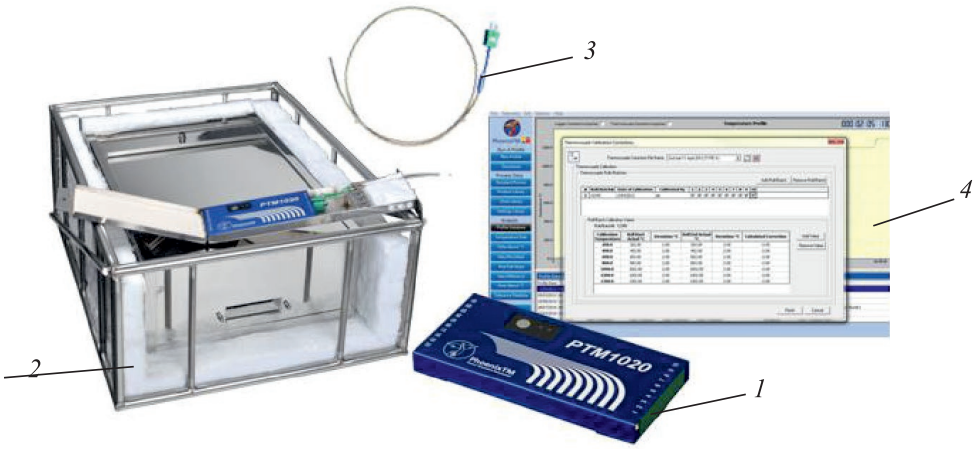


Рис. 2. Автономный регистратор температуры компании Phoenix TM:
1 – электронный автономный регистратор температуры; *2* – теплозащитный контейнер; *3* – гибкие термоэлектрические термометры; *4* – компьютерный интерфейс

Fig. 2 Autonomous temperature recorder “Phoenix TM”:
1 – electronic autonomous temperature recorder; *2* – heat-shielding container; *3* – flexible thermocouples; *4* – computer interface

Результаты исследования

Благодаря анализу большого массива данных, полученных в ходе проведения 15 автоматизированных направленных промышленных экспериментов на методических пятизонных печах стана 2000 и стана 5000 российских предприятий, появилась возможность создания статистической модели нагрева металла в процессе прохождения через зоны и на выходе из печи.

Адекватная статистическая модель позволяет, не осуществляя реальных экспериментов на объекте исследования, получить интересующую актуальную информацию о событиях, которые имеют место на реальном объекте. В рамках статистического моделирования регрессионный анализ является важнейшим инструментом исследования, который оценивает взаимосвязь между несколькими переменными и влияние независимых переменных на зависимую.

Можно выделить следующие этапы построения статистической математической модели (СММ) [20 – 23].

Отбор факторов модели. В качестве независимых переменных для методической зоны были выбраны: начальная температура сляба (°С), масса сляба (кг), толщина сляба (м), площадь сляба (м^2), длина зоны (м), время в зоне (с). Для всех последующих отапливаемых зон дополнительно были введены такие факторы, как средняя температура по сечениям сляба в начале зоны (°С), заданная температура верха (°С), заданная температура низа (°С).

Следует отметить, что достоинством СММ является то, что в ней используются только измеряемые параметры процесса (не используются неизвестные коэффициенты теплоотдачи конвекцией и излучением и неизвестное распределение температурного поля по зоне агрегата и др., которые всегда составляют основу аналитических математических моделей).

Построение регрессионной модели. Построение модели осуществлялось при помощи пакета Регрессия (Microsoft Office Excel), где в качестве независимых переменных выступали штатные измерения, а в качестве зависимых – температуры металла в конце каждой зоны. Важнейшим этапом построения регрессионной модели является оценка значимости модели и отдельных факторов, которая осуществлялась при помощи коэффициента детерминации R-квадрат (применяется при анализе общего качества уравнения линейной многофакторной регрессии), а также показателя значимости F (используется для проверки значимости коэффициента детерминации).

Корреляционный анализ, оценка значимости переменных. Предназначение корреляционного анализа сводится к выявлению наличия зависимости между различными факторами. При помощи корреляционного анализа появляется возможность подобрать переменные, обеспечивающие высокую значимость коэффициентов и уравнения в целом [24 – 26].

Построение регрессионной модели с учетом скорректированных факторов. На данном этапе повторно осуществлялся регрессионный анализ с применением скорректированных коэффициентов.

Получение уравнений регрессии. В результате было получено пятнадцать уравнений, которые описывают процесс нагрева металла в методической печи и обладают достаточной точностью.

Ниже представлены уравнения для каждого сечения в рамках пяти зон:

– методическая зона

$$t_в = -1964{,}029 + 0{,}087\tau + 0{,}037m + 3{,}777h,$$
$$t_ц = -1663{,}547 + 0{,}074\tau + 0{,}032m + 3{,}114h,$$
$$t_н = -2339{,}006 + 0{,}089\tau + 0{,}044m + 4{,}5h;$$

– зона подогрева

$$t_в = -561{,}739 + 0{,}044\tau + 0{,}924t_з^в + 0{,}306t_{ср.\,нач.}^в,$$
$$t_ц = -441{,}253 + 0{,}044\tau + 0{,}768t_з^в + 0{,}277t_{ср.\,нач.}^ц,$$
$$t_н = -295{,}045 + 0{,}033\tau + 0{,}739t_з^в + 0{,}311t_{ср.\,нач.}^н;$$

– 1-ая сварочная зона

$$t_в = -918{,}3 + 0{,}04\tau + 0{,}97t_з^в + 0{,}83t_{ср.\,нач.}^в,$$
$$t_ц = -1304{,}941 + 0{,}054\tau + 1{,}15t_з^в + 1{,}014t_{ср.\,нач.}^ц,$$
$$t_н = -531{,}257 + 0{,}024\tau + 0{,}801t_з^в + 0{,}662t_{ср.\,нач.}^н;$$

– 2-ая сварочная зона

$$t_в = -1365{,}631 + 0{,}038\tau + 0{,}584t_з^в + 1{,}433t_{ср.\,нач.}^в,$$
$$t_ц = -1870{,}117 + 0{,}051\tau + 0{,}707t_з^в + 1{,}713t_{ср.\,нач.}^ц,$$
$$t_н = -1264{,}588 + 0{,}04\tau + 0{,}663t_з^в + 1{,}265t_{ср.\,нач.}^н;$$

– томильная зона

$$t_в = 418{,}136 + 0{,}546t_{ср.\,нач.}^в + 10{,}805L + 5{,}429F,$$
$$t_ц = -378{,}321 + 0{,}496t_{ср.\,нач.}^ц + 0{,}029\tau + 0{,}753t_з^в,$$
$$t_н = 207{,}43 + 0{,}508t_{ср.\,нач.}^н + 0{,}313t_з^н,$$

где $t_в$ – среднее значение температуры верхней поверхности сляба, °С; $t_ц$ – среднее значение температуры центра сляба, °С; $t_н$ – среднее значение температуры нижней поверхности сляба, °С; τ – время в зоне, с; m – масса сляба, кг; h – толщина сляба, мм; $t_з^в$ – задание верх, °С; $t_з^н$ – задание низ, °С; $t_{ср.\,нач.}^в$, $t_{ср.\,нач.}^ц$, $t_{ср.\,нач.}^н$ – средняя температура поверхности, центра и низа сляба в начале зоны,°С; L – длина зоны, м; F – площадь сляба, м^2.

На рис. 3 представлен график, сравнивающий реальные значения СММ со значениями, которые предсказывает штатная математическая модель.

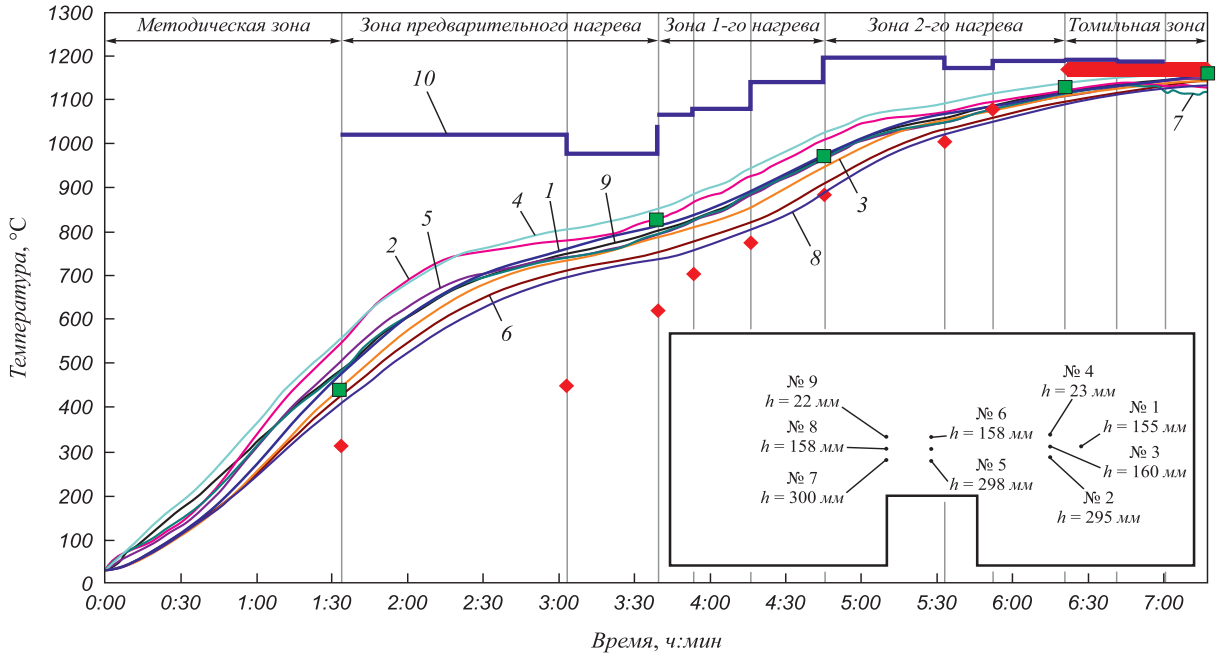


Рис. 3. Сравнение результатов одного из экспериментов (стан 5000):
1 – 155 мм; *2* – 295 мм; *3* – 160 мм; *4* – 23 мм; *5* – 298 мм; *6* – 158 мм; *7* – 300 мм; *8* – 158 мм; *9* – 22 мм; *10* – температура в зоне по показаниям штатных термоэлектрических термометров; ◆ – целевая температура в конце зоны по математической модели; ■ – по статистической модели

Fig. 3 Comparison of the experimental results (mill 5000):
1 – 155 mm; *2* – 295 mm; *3* – 160 mm; *4* – 23 mm; *5* – 298 mm; *6* – 158 mm; *7* – 300 mm; *8* – 158 mm; *9* – 22 mm; *10* – temperature in the zone according to the readings of the standard PCB; ◆ – target temperature at the end of the zone according to mathematical model; ■ – statistical model

Сводный расчет погрешностей модели по всем зонам

Consolidated error calculation for all zones

Эксперимент	По эксперименту, °С	По модели, °С	Ошибка, °С	Ошибка, %	По эксперименту, °С	По модели, °С	Ошибка, °С	Ошибка, %
	1-ая сварочная зона				*2-ая сварочная зона*			
	Верх				Верх			
1	1169,7	1130,2	39,5	3,4	1223,8	1276,7	–52,9	4,3
2	878,8	865,5	13,3	1,5	1051,3	1007,5	43,8	4,2
	Центр				Центр			
1	1106,2	1074,4	31,8	2,9	1209,4	1287,0	–77,6	6,4
2	812,9	804,4	8,5	1,0	993,9	941,0	52,9	5,3
	Низ				Низ			
1	1134,9	1116,3	18,6	1,6	1209,8	1261,4	–51,6	4,3
2	1012,5	935,2	77,3	7,6	1097,5	1016,4	81,1	7,4
	Подогревательная зона				*Томильная зона*			
	Верх				Верх			
1	924,2	835,7	88,5	9,6	1227,9	1237,1	–9,3	0,8
2	512,8	513,6	–0,9	0,2	1168,0	1142,3	25,7	2,2
	Центр				Центр			
1	784,5	737,9	46,6	5,9	1218,9	1245,6	–26,7	2,2
2	485,9	471,4	14,5	3,0	1127,7	1091,2	36,5	3,2
	Низ				Низ			
1	906,4	854,0	52,4	5,8	1207,8	1198,6	9,2	0,8
2	620,3	571,6	48,7	7,9	1148,7	1158,8	–10,0	0,9

График наглядно показывает, что рассчитанные по СММ значения достаточно близки к реальным показателям, в то время как значения ММ в некоторых точках, а именно с начала зоны предварительного нагрева и до начала зоны нагрева № 2 отличаются более, чем на 150 °С .

Проведена адаптация СММ посредством расчета температур верхней поверхности, центра и нижней поверхности металла по полученным уравнениям регрессии на основании данных двух дополнительных экспериментов. Результаты расчета температуры сляба на выдаче из печи, представленные в таблице, отличаются от экспериментальных не более, чем на 3,2 %, что говорит о высокой точности созданной модели.

Поскольку функция регрессии определена, интерпретирована и обоснована, а оценка точности регрессионного анализа соответствует требованиям, можно считать, что построенная модель и прогнозные значения обладают достаточной надежностью и являются средними значениями, которые можно ожидать.

Промышленные исследования позволяют изучать реальные температурные режимы нагрева металла по мере его продвижения в рабочем пространстве печи и на выдаче, а также сформулировать рекомендации по совершенствованию работы печи на базе результатов проведенных исследований.

Выводы

В результате использования регрессионного анализа в пакете Microsoft Excel построено 15 уравнений регрессии, составляющих СММ, для поверхности, центра и низа сляба в рамках пяти зон печи; установлена форма зависимости и направление связи между переменными; оценено качество полученной регрессионной прямой; подсчитаны отклонения расчетных данных от данных исходного набора; рассчитаны будущие значения зависимой переменной.

Таким образом создана адекватная статистическая модель, описывающая температурные режимы работы пятизонной методической печи.

Список литературы / References

1. Беленький А.М., Бурсин А.Н., Улановский А.А., Чибизова С.И. Совершенствование тепловой работы нагревательных печей станов горячей прокатки // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической информации. 2015. № 2. С. 62–69.
2. Беленький А.М., Бурсин А.Н., Мордовкин Д.С., Улановский А.А., Чибизова С.И. Задачи совершенствования тепловой работы и конструкции нагревательных печей станов горячей прокатки // Труды XI конгресса прокатчиков: Сборник трудов. Т. 1. Магнитогорск, 2017. С. 29–35.
3. Мордовкин Д.С. Исследование и оптимизация технологии нагрева непрерывнолитых слябов в методических печах: Дисс. … канд. техн. наук. Липецк, 2011. 214 с.
4. Орелкина Д.И., Петелин А.Л., Полулях Л.А., Подгородецкий Г.С. Модель расчета концентрации вторичных металлургических выбросов в атмосфере // Известия вузов. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 5. С. 300–305. http://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-5-300-305
5. Favennec Y., Labb V., Bay F. Induction heating processes optimization a general optimal control approach // Journal of Computational Physics. 2003. Vol. 187. No. 1. P. 68–94. http://doi.org/10.1016/S0021-9991(03)00081-0
6. Feischl M., Führer T., Niederer M., Strommer S., Steinboeck A., Praetorius D. Efficient numerical computation of direct exchange areas in thermal radiation analysis // Numerical Heat Transfer, Part B – Fundamentals. 2016. Vol. 69. No. 6. P. 511–533. http://doi.org/10.1080/10407790.2016.1173469
7. Wang H. Mathematical heat transfer model research for the improvement of continuous casting slab temperature // ISIJ International. 2005. Vol. 45. No. 9. P. 1291–1296. https://doi.org/10.2355/isijinternational.45.1291
8. Антипкина М.Е., Крупенников С.А., Левицкий И.А. Определение оптимальной толщины футеровки нагревательной печи // Новые Огнеупоры. 2019. № 10. С. 42–47.
9. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. М.: Металлургия, 1990. 239 с.
10. Арутюнов В.А., Левицкий И.А., Ибадуллаев Т.Б. Разработка методов математического моделирования теплофизических про-

1. Belen'kii A.M., Bursin A.N., Ulanovskii A.A., Chibizova S.I. Improvement in thermal operation of heating furnaces for hot rolling mills. *Chernaya metallurgiya. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2015, no. 2, pp. 62–69. (In Russ.).
2. Belen'kii A.M., Bursin A.N., Mordovkin D.S., Ulanovskii A.A., Chibizova S.I. Problems of improvement in thermal operation of heating furnaces for hot rolling mills. In: *XI Congress of Rollermen: Proceedings*. Vol. 1. Magnitogorsk, 2017, pp. 29–35. (In Russ.).
3. Mordovkin D.S. *Research and optimization of heating technology of continuously cast slabs in continuous furnace: Cand. Tech. Sci. Diss*. Lipetsk: 2011, 214 p. (In Russ.).
4. Orelkina D.I., Petelin A.L., Polulyakh L.A., Podgorodetskii G.S. Calculation model for the concentration of secondary metallurgical emissions into the atmosphere. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 5, pp. 300–305. (In Russ.). http://doi.org/10.17073/0368-0797-2016-5-300-305
5. Favennec Y., Labb V., Bay F. Induction heating processes optimization a general optimal control approach. *Journal of Computational Physics*. 2003, vol. 187, no. 1, pp. 68–94. http://doi.org/10.1016/S0021-9991(03)00081-0
6. Feischl M., Führer T., Niederer M., Strommer S., Steinboeck A., Praetorius D. Efficient numerical computation of direct exchange areas in thermal radiation analysis. *Numerical Heat Transfer, Part B – Fundamentals*. 2016, vol. 69, no. 6, pp. 511–533. http://doi.org/10.1080/10407790.2016.1173469
7. Wang H. Mathematical heat transfer model research for the improvement of continuous casting slab temperature. *ISIJ International*. 2005, vol. 45, no. 9, pp. 1291–1296. https://doi.org/10.2355/isijinternational.45.1291
8. Antipkina M.E., Krupennikov S.A., Levitskii I.A. Determination of optimum lining thickness for a heating furnace. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2020, vol. 60, no. 5, pp. 510–515. http://doi.org/10.1007/s11148-020-00395-2
9. Arutyunov V.A., Bukhmirov V.V., Krupennikov S.A. *Mathematical Modeling of Industrial Furnaces Thermal Operation*. Moscow: Metallurgiya, 1990, 239 p. (In Russ.).
10. Arutyunov V.A., Levitskii I.A., Ibadullaev T.B. Development of methods for mathematical modeling of thermophysical processes

цессов в топливных промышленных печах // Металлург. 2011. № 1–2. С. 33–37.
11. Alizadeh M., Edris H., Shafyei A. Mathematical modeling of heat transfer for steel continuous casting process // International Journal of ISSI. 2006. Vol. 3. No. 2. P. 7–16.
12. Chen W.H., Chung Y.C., Liu J.L. Analysis on energy consumption and performance of reheating furnaces in a hot strip mill // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2005. Vol. 32. No. 5. P. 695–706. http://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2004.10.019
13. Chen Y.W., Chai T.Y. Modelling and prediction for steel billet temperature of heating furnace // International Journal of Advanced Mechatronic Systems. 2010. Vol. 2. No. 5-6. P. 342–349.
14. Storck J., Lindberg B. A cost model for the effect of setup time reduction in stainless steel strip production // Proceedings, 1st Swedish Production Symposium. Gothenburg, Sweden, 2007. P. 1–8.
15. Han S.H., Chang D., Kim C.Y. A numerical analysis of slab heating characteristics in a walking beam type reheating furnace // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. Vol. 53. No. 19-20. P. 3855–3861. http://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.002
16. Wild D., Meurer T., Kugi A. Modelling and experimental model validation for a pusher-type reheating furnace // Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems. 2009. Vol. 15. No. 3. P. 209–232. http://doi.org/10.1080/13873950902927683
17. Беленький А.М., Дубинский М.Ю., Калимулина С.И. Промышленный эксперимент – основа проведения энергосберегающей политики в металлургической теплотехнике // Металлург. 2010. № 5. С. 26–29.
18. Беленький А.М., Дубинский М.Ю., Ладыгичев М.Г. Температура: теория, практика, эксперимент. Т. 2. Измерение температуры в промышленности и энергетике. М.: Теплотехник, 2007. 736 с.
19. Улановский А.А., Тааке М., Беленький А.М., Бурсин А.Н., Чибизова С.И. Использование автономной автоматизированной системы компании Phoenix TM для мониторинга температурного поля нагреваемого металла в металлургических печах // Черные металлы. 2019. № 9. С. 59–64.
20. Богатова М.Ж., Чибизова С.И. Статистическое моделирование температурных режимов работы нагревательных печей листовых станов горячей прокатки // Труды IX Международной научно-практической конференции «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология» 12–14 декабря 2018 г., Москва. С. 196–203.
21. Радченко Ю.С. Основы статистического моделирования: Учебное пособие для вузов. Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2010. 30 с.
22. Улановский А.А., Беленький А.М. Повышение эффективности нагревательных печей станов горячей прокатки // Труды VI Международной научно-практической конференции «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология». М.: МИСиС, 2012. С. 472–484.
23. Carlsson L.S., Samuelsson P.B., Jönsson P.G. Using statistical modeling to predict the electrical energy consumption of an electric arc furnace producing stainless steel // Metals. 2020. Vol. 10. No. 1. Article 36. http://doi.org/10.3390/met10010036
24. Hsieh C.T., Huang M.J., Lee S.T. Numerical modeling of a walking-beam-type slab reheating furnace // Numerical Heat Transfer; Part A – Applications. 2008. Vol. 53. No. 9. P. 966–981. http://doi.org/10.1080/10407780701789831
25. Kim J.G., Huh K.Y., Kim I.T. Three-dimensional analysis of the walking-beam-type slab reheating furnace in hot strip mills // Numerical Heat Transfer; Part A – Applications. 2000. Vol. 38. No 6. P. 589–609. http://doi.org/10.1080/104077800750021152
26. Santos C.P., Giacomin C.N. Computer simulation of slab reheating process in walking beam furnaces // Tecnologia em Metalurgia e Materiais. 2008. Vol. 5. No. 1. P. 35–39.

in industrial fuel furnaces. *Metallurgist*. 2011, vol. 55, no. 1–2, pp. 3–9. http://doi.org/10.1007/s11015-011-9385-7
11. Alizadeh M., Edris H., Shafyei A. Mathematical modeling of heat transfer for steel continuous casting process. *International Journal of ISSI*. 2006, vol. 3, no. 2, pp. 7–16.
12. Chen W.H., Chung Y.C., Liu J.L. Analysis on energy consumption and performance of reheating furnaces in a hot strip mill. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2005, vol. 32, no. 5, pp. 695–706. http://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2004.10.019
13. Chen Y.W., Chai T.Y. Modelling and prediction for steel billet temperature of heating furnace. *International Journal of Advanced Mechatronic Systems*. 2010, vol. 2, no. 5-6, pp. 342–349.
14. Storck J., Lindberg B. A cost model for the effect of setup time reduction in stainless steel strip production. In: *Proceedings, 1st Swedish Production Symposium. Gothenburg, Sweden*, 2007, pp. 1–8.
15. Han S.H., Chang D., Kim C.Y. A numerical analysis of slab heating characteristics in a walking beam type reheating furnace. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010, vol. 53, no. 19-20, pp. 3855–3861. http://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.05.002
16. Wild D., Meurer T., Kugi A. Modelling and experimental model validation for a pusher-type reheating furnace. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. 2009, vol. 15, no. 3, pp. 209–232. http://doi.org/10.1080/13873950902927683
17. Belen'kii A.M., Dubinskii M.Yu., Kalimulina S.I. Factory testing – The basis for implementing an energy-saving policy in metallurgical heat engineering. *Metallurgist*. 2010, vol. 54, no. 5-6, pp. 263–267. http://doi.org/10.1007/s11015-010-9290-5
18. Belen'kii A.M., Dubinskii M.Yu., Ladygichev M.G. *Temperature: Theory, Practice, Experiment. Vol. 2: Temperature Measurement in Industry and Power Engineering*. Moscow: Teplotekhnik, 2007, 736 p. (In Russ.).
19. Ulanovskii A.A., Taake M., Belen'kii A.M., Bursin A.N., Chibizova S.I. Using a Phoenix TM autonomous automated system for monitoring temperature field of metal to be heated in metallurgical furnaces. *Chernye metally*. 2019, no. 9, pp. 59–64. (In Russ.).
20. Bogatova M.Zh., Chibizova S.I. Statistical modeling of temperature operating modes of heating furnaces for strip hot rolling mill. In: *Proceedings of the IX Int. Sci. and Pract. Conf. "Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies. Furnace Aggregates. Ecology" December 12–14, 2018, Moscow*, pp. 196–203. (In Russ.).
21. Radchenko Yu.S. *Basics of Statistical Modeling: Manual for Universities*. Voronezh: VSU, 2010, 30 p. (In Russ.).
22. Ulanovskii A.A., Belen'kii A.M. Improving efficiency of heating furnaces of rolling mills. In: *Proceedings of the IX Int. Sci. and Pract. Conf. "Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies. Furnace Aggregates. Ecology"*. Moscow: NUST "MISIS", 2012, pp. 472–484. (In Russ.).
23. Carlsson L.S., Samuelsson P.B., Jönsson P.G. Using statistical modeling to predict the electrical energy consumption of an electric arc furnace producing stainless steel. *Metals*. 2020, vol. 10, no. 1, article 36. http://doi.org/10.3390/met10010036
24. Hsieh C.T., Huang M.J., Lee S.T. Numerical modeling of a walking-beam-type slab reheating furnace. *Numerical Heat Transfer; Part A – Applications*. 2008, vol. 53, no. 9, pp. 966–981. http://doi.org/10.1080/10407780701789831
25. Kim J.G., Huh K.Y., Kim I.T. Three-dimensional analysis of the walking-beam-type slab reheating furnace in hot strip mills. *Numerical Heat Transfer; Part A – Applications*. 2000, vol. 38, no. 6, pp. 589–609. http://doi.org/10.1080/104077800750021152
26. Santos C.P., Giacomin C.N. Computer simulation of slab reheating process in walking beam furnaces. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*. 2008, vol. 5, no. 1, pp. 35–39.

Сведения об авторах

Майя Жемлейловна Богатова, *аспирант кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий,* Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
E-mail: ma95bers@gmail.com

Светлана Игоревна Чибизова, *к.т.н., доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий,* Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
E-mail: s_kalimulina@mail.ru

Information about the authors

Maiya Zh. Bogatova, *Postgraduate of the Chair "Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies",* National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS)
E-mail: ma95bers@gmail.com

Svetlana I. Chibizova, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies",* National University of Science and Technology "MISIS" (MISIS)
E-mail: s_kalimulina@mail.ru

Поступила в редакцию 29.10.2020
После доработки 02.11.2020
Принята к публикации 01.03.2021

Received 29.10.2020
Revised 02.11.2020
Accepted 01.03.2021

Оригинальная статья
УДК 621.313
DOI 10.17073/0368-0797-2021-5-382-388

Разработка автоматизированного электропривода системы управления двухкоординатным станком сварки

К. В. Лицин [1], А. В. Цуканов [2]

[1] **Южно-Уральский государственный университет** (Россия, 454080, Челябинск, пр. Ленина, 76)
[2] **Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС»** (Россия, 426359, Оренбургская обл., Новотроицк, ул. Фрунзе, 8)

Аннотация. В статье рассматривается двухкоординатный станок сварки. Подобное оборудование используется с целью получения сварочных швов на различных элементах металлоконструкций высокого качества. Основной недостаток имеющегося оборудования заключается в том, что работа на данном станке в настоящее время выполняется вручную. Это операция является достаточно опасной и монотонной. Кроме того, в качестве основного привода системы используется гидропривод. Обоснована замена гидропривода двухкоординатного станка сварки на электропривод с целью повышения КПД всей системы. Выполнена разработка автоматизированного электропривода двухкоординатного станка сварки закладных, управляемого на базе программируемого логического контроллера. Проведено проектирование электропривода объекта. Реализован выбор необходимых элементов разработанной системы автоматизации. На основе технологического процесса разработан алгоритм, который позволяет автоматизировать процесс сварки закладных. Данный алгоритм предусматривает необходимые меры безопасности, осуществляя самодиагностику на этапе запуска системы. С целью проверки работоспособности разработанного алгоритма выполнено моделирование автоматизированного электропривода с помощью программного обеспечения Matlab Simulink. Система содержит два внутренних и три внешних контура, осуществляющих контроль необходимых параметров: скорости, тока, момента, потокосцепления и усилия. Получены динамические характеристики представленных параметров, подтверждающие работоспособность разработанной системы автоматизированного электропривода. Проведен экономический расчет предлагаемой к внедрению системы автоматизации. Суммарные затраты на модернизацию составят порядка 55 тыс. рублей при сроке окупаемости около одного года.

Ключевые слова: черная металлургия, трубная промышленность, двигатель переменного тока, двухкоординатный станок сварки, преобразователь частоты, электропривод, гидропривод, векторное управление

Для цитирования: Лицин К.В., Цуканов А.В. Разработка автоматизированного электропривода системы управления двухкоординатным станком сварки // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 382–388. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-382-388

Original article

Automated electric drive for the control system of two-coordinate welding machine

K. V. Litsin [1], A. V. Tsukanov [2]

[1] **South Ural State University** (76 Lenina Ave., Chelyabinsk 454080, Russian Federation)
[2] **Novotroitsk Branch of the National University of Science and Technology "MISIS"** (8 Frunze Str., Novotroitsk, Orenburg Region 426359, Russian Federation)

Abstract. Two-coordinate welding machine is used to obtain welds on various elements of high quality metal structures. The main disadvantage of the existing equipment is that the work on this machine is currently performed manually. This operation is quite dangerous and monotonous. In addition, hydraulic drive is used as the main drive of the system. Replacement of the hydraulic drive of a two-coordinate welding machine with an electric drive is substantiated in order to increase the efficiency of the entire system. The authors have developed an automated system for a two-coordinate machine for welding embeds, controlled on the basis of a programmable logic controller. A functional diagram of an automated electric drive for such machine was proposed. The design of the object's electric drive was carried out. The necessary elements of the developed automation system were selected. On the basis of the technological process, an algorithm has been developed that allows automating the process of embeds welding. The developed algorithm provides the necessary security measures, carrying out self-diagnostics at the stage of system startup. In order to check the performance of the developed algorithm, an automated electric drive was simulated using the MATLAB Simulink software. The developed system contains two internal and three external circuits that control the required parameters: speed, current, torque, flux linkage and force. The dynamic characteristics of the presented parameters are obtained, confirming the operability of the developed automated electric drive system. An economic calculation of the automation system proposed for implementation has been carried out. The total costs for the modernization will amount about 55 thousand rubles with a payback period of about one year.

Keywords: ferrous metallurgy, pipe industry, AC motor, two-coordinate welding machine, frequency converter, electric drive, hydraulic drive, vector control

For citation: Litsin K.V., Tsukanov A.V. Automated electric drive for the control system of two-coordinate welding machine. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 5, pp. 382–388. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-382-388

Введение и постановка задачи

В современном мире в конкурентных условиях промышленные производители вынуждены по максимуму использовать свое оборудование [1 – 3]. Даже незначительное увеличение производительности рабочих машин может привести к росту прибыли предприятия [4]. Не исключением стала и черная металлургия, в которой особое внимание уделяется модернизации оборудования [5 – 7].

В данной работе рассматривается сварочный комплекс, установленный на предприятии АО «Рифар» (г. Гай, Оренбургская область) [8]. Объектом исследования является двухкоординатный станок сварки закладных, в котором выявлена проблема существенных потерь при эксплуатации гидравлического привода и отсутствия системы автоматики для управления процессом сварки. На данном станке можно изготавливать продукцию, которая может эксплуатироваться в черной металлургии. Закладные детали всегда применяются при строительстве нового объекта или опор освещения, что неизбежно на предприятии любой отрасли. К примеру, для монтажа опор освещения часто используются трубные закладные элементы (типа ФТ) и закладные фундаментальные блоки. Они представляют собой металлоконструкцию, состоящую из трубы определенного сечения с приваренным к ней фланцем [9]. Целью данной работы является разработка автоматизированного электропривода двухкоординатного станка варки, что позволит улучшить качество швов и сократить время цикла сварки. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– обосновать и реализовать замену гидропривода на электропривод для двухкоординатного станка сварки закладных;

– разработать алгоритм работы двухкоординатного станка сварки закладных;

– разработать и исследовать модель электропривода прижима двухкоординатного станка сварки закладных.

Описание схемы установки

На рис. 1 представлен внешний вид и элементы двухкоординатного сварочного станка, который предназначен для сварки половинок закладной под действием контактной сварки [10].

Станок работает на основе гидравлического привода, который состоит из трех гидравлических цилиндров и пяти гидроклапанов – одного клапана безопасности, трех рабочих, идущих на гидроцилиндры, и одного резервного. Также станок оборудован электроприводом для приведения в движение задвижки правой половины закладной [11].

Среди недостатков гидропривода можно выделить:

– сложность конструкции и высокие требования к технологии изготовления отдельных элементов гидравлического привода;

– достаточно высокую сложность коммуникаций высокого давления;

– прихотливость в эксплуатации и высокую стоимость.

Поэтому замена гидропривода на электропривод, лишенного указанных недостатков, является необходимым шагом.

Электрический привод двухкоординатного станка для сварки закладных должен соответствовать следующим требованиям:

– точность позиционирования и останова;

– минимальное время разгона и торможения (не более 0,5 с);

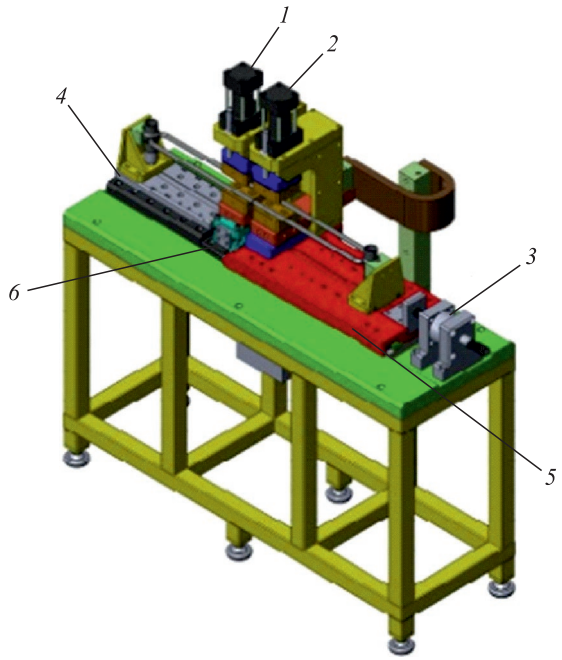


Рис. 1. Общий вид двухкоординатного станка сварки закладных: *1* – цилиндр блокиратора левой половины; *2* – цилиндр блокиратора правой половины; *3* – цилиндр прижима правой половины; *4* – ложемент левой половины; *5* – ложемент правой половины; *6* – сварочный коллектор

Fig. 1. General view of a two-coordinate machine for embeds welding: *1* – left half blocker cylinder; *2* – right half blocker cylinder; *3* – cylinder for pressing the right half; *4* – lodgment of the left half; *5* – lodgment of the right half; *6* – welding manifold

– обеспечение усилия, соответствующего силовым характеристикам процесса;
– широкий диапазон рабочих температур;
– безотказность;
– обеспечение надежности работы;
– обеспечение требуемого уровня автоматизации;
– стойкость к ударным вибрационным нагрузкам;
– обеспечение работоспособности под воздействием постоянного магнитного и переменных полей сетевой частоты [12].

Для электрического привода двухкоординатного станка сварки закладных выбрана система электропривода «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» (ПЧ-АД), как обладающая наибольшими преимуществами в сравнении с другими системами электропривода [13 – 16].

С целью отслеживания состояния элементов, осуществляющих движение, в разработанной автоматической системе двухкоординатного станка имеются датчики для левого и правого прижима, верхнего домашнего положения и нижнего рабочего положения и два датчика, отслеживающих наличие закладных. В качестве датчиков используется бесконтактный индуктивный выключатель с увеличенным расстоянием срабатывания компании «Сенсор» серии ВБИ-М12-60Р-1113-С.51 [17].

На схеме системы управления двухкоординатного станка сварки, которая представлена на рис. 2, изображен объект управления и средства его автоматизации.

Разработан алгоритм работы двухкоординатного станка сварки закладных. В процессе запуска системы с целью проверки готовности станка к работе осуществляется опрос аварийных кнопок. На следующем этапе реализуется опрос готовности системы частотных преобразователей. Далее следует проверка готовности сварочного инвертора.

Алгоритм дальнейших действий подробно представлен на рис. 3. Непосредственно в процессе работы осуществляется опрос датчиков правого прижима. Полученный сигнал готовности поступает на сварочный коллектор, разрешая осуществление сварки закладных. После процесса сваривания идет опрос сварочного инвертора об окончании, вследствие чего происходит процесс разблокировки закладной и отвод прижимов в исходное положение. На этом процесс сварки подходит к концу, и оператор может вытаскивать закладную для ее дальнейшей транспортировки.

Три электропривода, представленных на рис. 2, работают согласно единому алгоритму (рис. 3). Однако с целью проведения дальнейших исследований и удовлетворения требованиям, представленным выше, а также реализации большего числа действий алгоритма, наибольший интерес представляет электропривод прижима правой половины, содержащий в своем составе

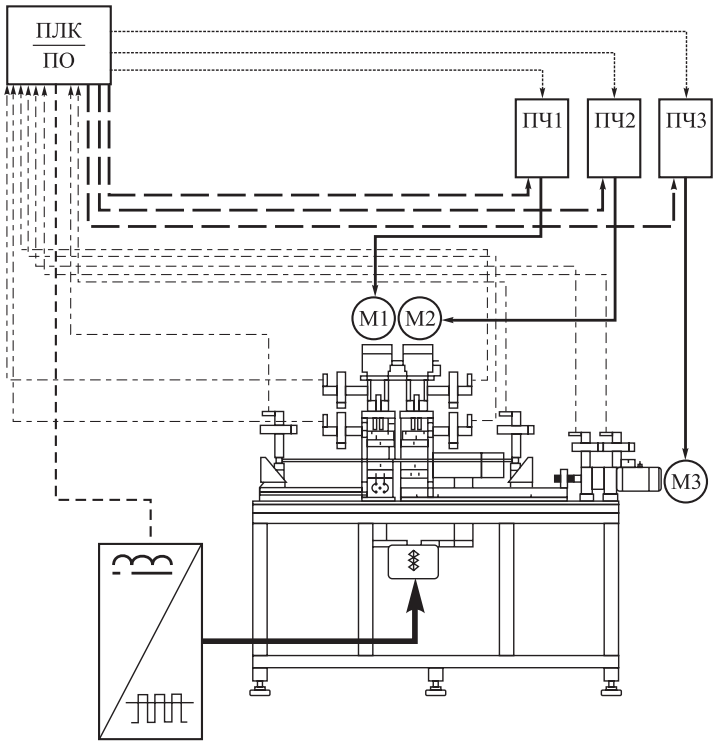


Рис. 2. Система управления двухкоординатным станком сварки:
ПЛК/ПО – программируемый логический контроллер и программное обеспечение; ПЧ – преобразователь частоты;
М – электрический двигатель

Fig. 2. Control system for two-coordinate welding machine:
ПЛК/ПО – programmable logic controller and software; ПЧ – frequency converter; M – electric motor

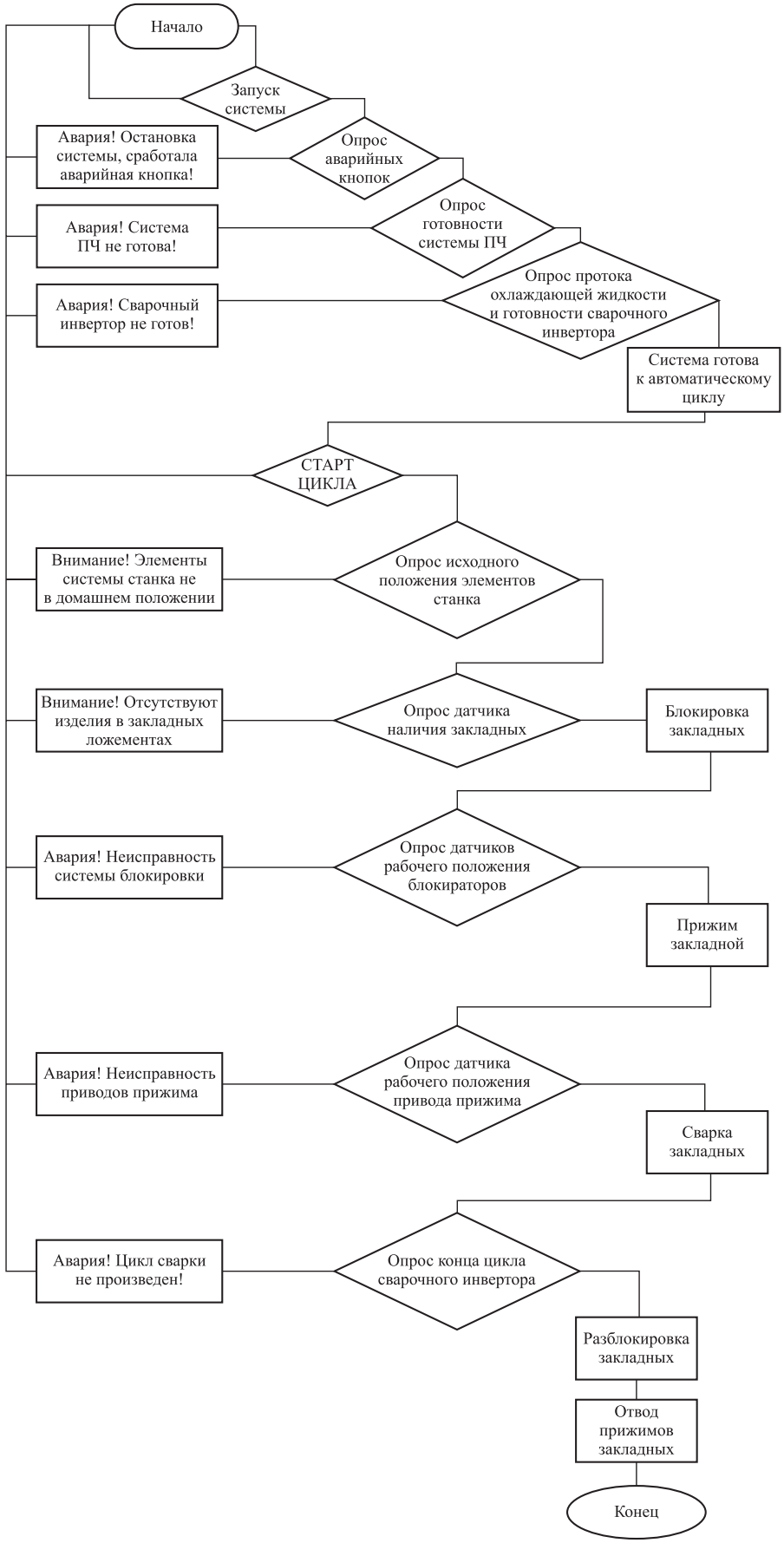


Рис. 3. Алгоритм работы станка

Fig. 3. Algorithm of the machine operation

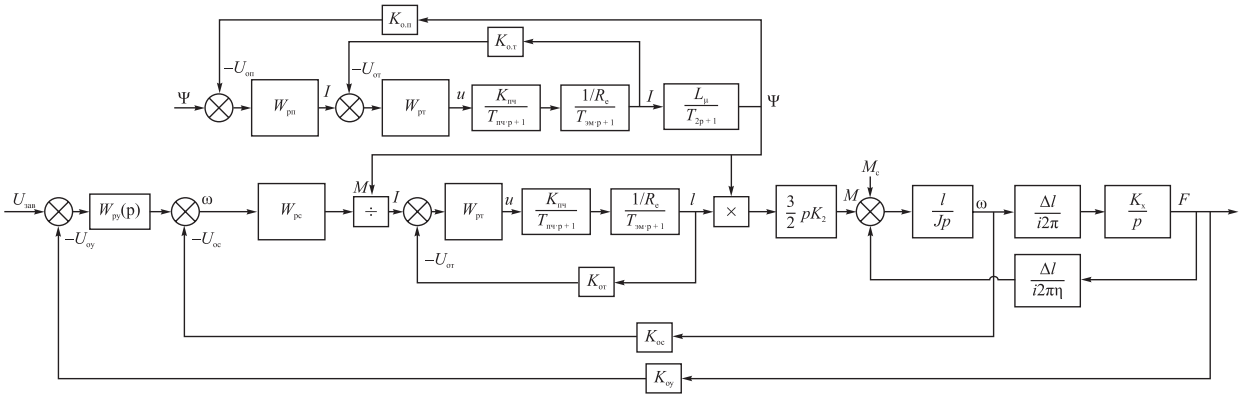


Рис. 4. Структурная схема электропривода:
$W_{рс}$ – передаточная функция регулятора скорости; $W_{рт}$ – передаточная функция регулятора тока; $W_{ру}$ – передаточная функция регулятора усилия; $K_{пч}$ – пропорциональный коэффициент преобразователя частоты; $T_{эм}$ – электромеханическая постоянная времени двигателя; $T_{пч}$ – постоянная времени преобразователя частоты; R_e – активное сопротивление двигателя; J – момент инерции; i – передаточное число; Δl – величина относительного перемещения; K_x – жесткость пружины

Fig. 4. Block diagram of the electric drive:
$W_{рс}$ – transfer function of the speed controller; $W_{рт}$ – transfer function of the current regulator; $W_{ру}$ – transfer function of the force regulator; $K_{пч}$ – proportional coefficient of the frequency converter; $T_{эм}$ – electromechanical time constant of the engine; $T_{пч}$ – time constant of the frequency converter; R_e – active resistance of the motor; J – moment of inertia; i – gear ratio; Δl – value of the relative displacement; K_x – stiffness of the spring

электродвигатель М3 (см. рис. 2). В программе Matlab Simulink на основе известных методик [18 – 20] разработана структурная схема электропривода (рис. 4). Схема включает в себя два внутренних контура регулирования по току с коэффициентом обратной связи $K_{от}$, а также три внешних контура регулирования: потокосцепления с коэффициентом обратной связи по потокосцеплению $K_{оψ}$, скорости с коэффициентом обратной связи по скорости $K_{ос}$ и контур регулирования усилия с коэффициентом обратной связи по усилию $K_{оу}$.

Особенностью представленной структурной схемы электропривода является наличие контура регулирования усилия, который позволяет добиться плавности прикладываемого усилия (без ударов и перерегулирования) с целью устранения повреждений заготовки. В результате моделирования в программной среде Matlab Simulink был получен график скорости режима работы станка, который представлен на рис. 5.

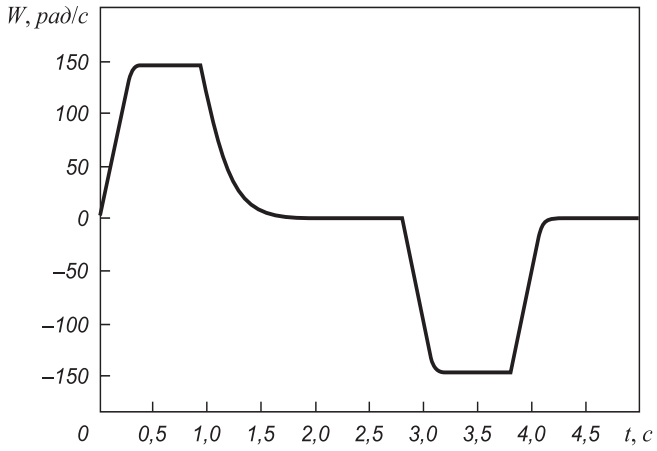


Рис. 5. График скорости режима работы станка

Fig. 5. Speed graph of the machine operating mode

Из графика, представленного на рис. 5 следует, что величина перерегулирования в процессе перемещения прижима правой половины равна нулю. Скорость нарастания процесса плавная, без колебаний. Следовательно, достигается требование по обеспечению усилия, соответствующего силовым характеристикам процесса. Достижение номинальной величины скорости (время регулирования) не превышает 0,5 с, что удовлетворяет требованиям по точности позиционирования и времени разгона.

Выводы

Обоснована замена гидравлического привода на электрический, основанная на недостатках гидропривода.

Разработанный алгоритм работы двухкоординатного станка сварки исследован на созданной математической модели электропривода прижима правой половины. Достоверность расчетов и построения модели подтверждается полученным графиком скорости. Полученный переходный процесс скорости, отсутствие перерегулирования, время переходного процесса разгона, равного 0,27 с, плавность разгона и торможения по причине отсутствия колебаний подтверждают правомерность проведенных расчетов и возможность использования разработанного алгоритма на двухкоординатном станке сварки.

При внедрении предлагаемого решения на базе АО «Рифар» суммарные затраты на модернизацию составят порядка 55 тыс. рублей при сроке окупаемости один год.

Список литературы

1. Pancrecious J.K., Ulaeto S.B., Ramya R., Rajan T.P.D., Pai B.C. Metallic composite coatings by electroless technique – A critical review // International Materials Reviews. 2018. Vol. 63. No. 8. P. 488–512. https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1506692
2. Setareh M., Parniani M., Aminifar F. An analytic methodology to determine generators redispatch for proactive damping of critical electromechanical oscillations // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2020. Vol. 123. Article 106301. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106301
3. Sames W.J., List F.A., Pannala S., Dehoff R.R., Babu S.S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing // International Materials Reviews. 2016. Vol. 61. No. 5. P. 315–360. https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649
4. Wu Q., Xu W., Zhang L. Machining of particulate-reinforced metal matrix composites: An investigation into the chip formation and subsurface damage // Journal of Materials Processing Technology. 2019. Vol. 274. Article 116315. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116315
5. Li Y., Han Q., Horvath I., Zhang G. Repairing surface defects of metal parts by groove machining and wire + arc based filling // Journal of Materials Processing Technology. 2019. Vol. 274. Article 116268. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116268
6. Yang J., Hu A., Li Y., Chandra Saha D., Yu Z. Heat input, intermetallic compounds and mechanical properties of Al/steel cold metal transfer joints // Journal of Materials Processing Technology. 2019. Vol. 272. P. 40–46. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.05.004
7. Sames W.J., List F.A., Pannala S., Dehoff R.R., Babu S.S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing // International Materials Reviews. 2016. Vol. 61. No. 5. P. 315–360. https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649
8. Официальный сайт АО «Рифар». Режим доступа: https://rifar.ru/
9. Соколов В.А., Саяпин Ю.А., Шестель Л.А. Контроль сварных соединений при сварке труб, сваренных при помощи закладных нагревателей // Техника и технологии машиностроения: Материалы VIII Международной научно-технической конференции. 2019. № 7. С. 131–133.
10. Зыкина Е.А., Букреев М.В., Чепик А.А. Модернизация учебного сварочного оборудования для повышения качества подготовки специалистов сварочного производства в нефтегазовой отрасли // Вестник современных исследований. 2018. № 4.2(19). С. 233–234.
11. Buyuk M., Inci M., Tan A., Tumay M. Improved instantaneous power theory based current harmonic extraction for unbalanced electrical grid conditions // Electric Power Systems Research. 2019. Vol. 177. Article 106014. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106014
12. Онищенко Г.Б. Автоматизированный электропривод промышленных установок. М.: РАСХН, 2001. 509 с.
13. Басков С.Н., Лицин К.В., Радионов А.А. Определение углового положения ротора синхронного двигателя в режиме векторно-импульсного пуска // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2014. № 4. С. 3–8.
14. Mao H., Xiao J. Real-time conflict resolution of task-constrained manipulator motion in unforeseen dynamic environments // IEEE Transactions on Robotics. 2019. Vol. 35. No. 5. P. 1276–1283. https://doi.org/10.1109/TRO.2019.2924556
15. Hong J., Wang Z., Zhang T., Zhang Y., Li Y. Research on integration simulation and balance control of a novel load isolated pure electric driving system // Energy. 2019. Vol. 189. Article 116220. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116220
16. Baskov S.N., Litsin K.V. Determination of the angular position of the rotor of asynchronous motor by connecting a high-frequency signal in the excitation winding // Proceedings of 2015 Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON). 2015. http://doi.org/10.1109/SIBCON.2015.7146993

References

1. Pancrecious J.K., Ulaeto S.B., Ramya R., Rajan T.P.D., Pai B.C. Metallic composite coatings by electroless technique – A critical review. *International Materials Reviews*. 2018, vol. 63, no. 8, pp. 488–512. https://doi.org/10.1080/09506608.2018.1506692
2. Setareh M., Parniani M., Aminifar F. An analytic methodology to determine generators redispatch for proactive damping of critical electromechanical oscillations. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2020, vol. 123, article 106301. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106301
3. Sames W.J., List F.A., Pannala S., Dehoff R.R., Babu S.S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*. 2016, vol. 61, no. 5, pp. 315–360. https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649
4. Wu Q., Xu W., Zhang L. Machining of particulate-reinforced metal matrix composites: An investigation into the chip formation and subsurface damage. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019, vol. 274, article 116315. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116315
5. Li Y., Han Q., Horvath I., Zhang G. Repairing surface defects of metal parts by groove machining and wire + arc based filling. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019, vol. 274, article 116268. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116268
6. Yang J., Hu A., Li Y., Chandra Saha D., Yu Z. Heat input, intermetallic compounds and mechanical properties of Al/steel cold metal transfer joints. *Journal of Materials Processing Technology*. 2019, vol. 272, pp. 40–46. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.05.004
7. Sames W.J., List F.A., Pannala S., Dehoff R.R., Babu S.S. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*. 2016, vol. 61, no. 5, pp. 315–360. https://doi.org/10.1080/09506608.2015.1116649
8. *Official site of JSC "Rifar"*. Available at URL: https://rifar.ru/
9. Sokolov V.A., Sayapin Yu.A., Shestel' L.A. Inspection of welded joints when welding pipes welded with embedded heaters. In: *Materials of the VIII Int. Sci. and Tech. Conf. "Engineering and Technology of Mechanical Engineering"*. 2019, no. 7, pp. 131–133. (In Russ.).
10. Zykina E.A., Bukreev M.V., Chepik A.A. Modernization of educational welding equipment to improve the quality of training of welding specialists in the oil and gas industry. *Vestnik sovremennykh issledovanii*. 2018, no. 4.2 (19), pp. 233–234. (In Russ.).
11. Buyuk M., Inci M., Tan A., Tumay M. Improved instantaneous power theory based current harmonic extraction for unbalanced electrical grid conditions. *Electric Power Systems Research*. 2019, vol. 177, article 106014.https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.106014
12. Onishchenko G.B. *Automated Electric Drive of Industrial Plants*. Moscow: RAAS, 2001, 509 p. (In Russ.).
13. Baskov S.N., Litsin K.V., Radionov A.A. Determination of angular position of synchronous motor rotor in the mode of vector-pulse start. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya*. 2014, no. 4, pp. 3–8. (In Russ.).
14. Mao H., Xiao J. Real-time conflict resolution of task-constrained manipulator motion in unforeseen dynamic environments. *IEEE Transactions on Robotics*. 2019, vol. 35, no. 5, pp. 1276–1283. https://doi.org/10.1109/TRO.2019.2924556
15. Hong J., Wang Z., Zhang T., Zhang Y., Li Y. Research on integration simulation and balance control of a novel load isolated pure electric driving system. *Energy*. 2019, vol. 189, article 116220. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116220
16. Baskov S.N., Litsin K.V. Determination of the angular position of the rotor of asynchronous motor by connecting a high-frequency signal in the excitation winding. *Proceedings of 2015 Int. Siberian Conf. on Control and Communications (SIBCON)*. 2015. http://doi.org/10.1109/SIBCON.2015.7146993

17. Бурулько Л.К., Дементьев Ю.Н. Электрооборудование промышленности. Электроприводы промышленных механизмов и устройств: Учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 180 с.

18. Zhou L., Tokekar P. Sensor assignment algorithms to improve observability while tracking targets // IEEE Transactions on Robotics. 2019. Vol. 35. No. 5. P. 1206–1219. https://doi.org/10.1109/TRO.2019.2920749

19. Стаценко А.В. Модель асинхронного двигателя для анализа энергетических показателей в программной среде MATLAB Simulink // Colloquium-Journal. 2018. № 1–1(12). P. 27–33.

20. Лицин К.В., Гусев А.А., Ковальчук Т.В. Исследование электропривода системы подачи шлакообразующей смеси в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок // Известия вузов. Электромеханика. 2018. Т. 61. № 5. С. 38–43.

17. Burul'ko L.K., Dement'ev Yu.N. *Industrial Electrical Equipment. Electric Drives of Industrial Mechanisms and Devices: A tutorial.* Tomsk: TPU, 2012, 180 p. (In Russ.).

18. Zhou L., Tokekar P. Sensor assignment algorithms to improve observability while tracking targets. *IEEE Transactions on Robotics*. 2019, vol. 35, no. 5, pp.1206–1219. https://doi.org/10.1109/TRO.2019.2920749

19. Statsenko A.V. Model of an asynchronous motor for analyzing energy performance in the MATLAB Simulink software environment. *Colloquium-Journal*. 2018, no. 1–1(12), pp. 27–33. (In Russ.).

20. Litsin K.V., Gusev A.A., Koval'chuk T.V. Electric drive for the system of slag-forming mixture supply into a CCM mold. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*. 2018, vol. 61, no. 5, pp. 38–43. (In Russ.).

Сведения об авторах / Information about the authors

Лицин Константин Владимирович, *к.т.н., доцент кафедры «Мехатроника и автоматизация»,* Южно-Уральский государственный университет
E-mail: k.litsin@rambler.ru

Litsin V. Konstantin, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Mechatronics and Automation",* South Ural State University
E-mail: k.litsin@rambler.ru

Цуканов Андрей Витальевич, *студент,* Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС»
E-mail: 03-06-2000@mail.ru

Tsukanov V. Andrei, *Student,* Novotroitsk Branch of the National University of Science and Technology "MISIS"
E-mail: 03-06-2000@mail.ru

Поступила в редакцию 21.10.2020
После доработки 04.04.2021
Принята к публикации 16.04.2021

Received 21.10.2020
Revised 04.04.2021
Accepted 16.04.2021

Наукометрические показатели журнала

В 2017 году международная база данных Scopus возобновила индексирование журнала «Известия ВУЗов. Черная металлургия». На инфографике отражены текущие показатели.

Данные предоставлены сайтами www.scopus.com и www.scimagojr.com.

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*

Расенець В.В., *верстка, иллюстрации*

Кузнецов А.А., *системный администратор*

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

Подписано в печать 28.05.2021. Формат 60×90 $^{1}/_{8}$. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 9,0. Заказ. Цена свободная.

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

Индекс 70383

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

Briquetting of porous alumina-containing materials with organic binders

Quality improvement of calibrated steel by surface deformation. Part 2. Effect of enveloping surface deformation on residual stresses in cylindrical bars

Accounting method for residual technological stresses in modeling the stress-deformed state of a railway wheel disk. Report 1

Optimization of production technology of continuous cast rail steel for increasing its purity by non-metallic inclusions

Thermodynamic modeling of nickel and iron reduction from B_2O_3–CaO–Fe_2O_3–NiO melt by CO–CO_2 and H_2–H_2O mixtures

On thermodynamics of iron reduction from oxides

Wagner interaction coefficient between nitrogen and cobalt in liquid nickel-based alloys

Development of flotation machine impeller on the base of additive technologies

Statistical modeling of temperature operating modes of heating furnaces for hot strip mills

Automated electric drive for the control system of two-coordinate welding machine