

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY

fermet.misis.ru

2023 Том 66 № 6
Vol. 66 No. 6

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

Прогнозирование содержания углерода в металле заключительного периода продувки в кислородном конвертере с использованием нейросети

Оценка эффективности электроплавки металлизированного сидеритового концентрата

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Анализ зоны контакта системы «покрытие/подложка», подвергнутой облучению импульсным электронным пучком

Исследование структуры и анизотропии механических свойств стального изделия, полученного методом послойной электродуговой проволочной 3D-печати



ISSN 0368-0797
eISSN 2410-2091

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Научно-технический журнал

Издается с января 1958 г. Выпускается 6 раз в год

2023 Том 66 № 6
Vol. 66 No. 6

IZVESTIYA FERROUS METALLURGY

Scientific and Technical Journal

Published since January 1958. Issued 6 times a year

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

www.fermet.misis.ru

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

Варианты названия:

Известия вузов. Черная металлургия

Izvestiya. Ferrous Metallurgy

Учредители:



Редакционная коллегия:

Г. В. Ашихмин, д.т.н., профессор, ОАО «Ин-Т Цветметобработка», г. Москва
С. О. Байсанов, д.т.н., профессор, ХМИ им. Ж.Абишева, г. Караганда, Республика Казахстан
В. Д. Белов, д.т.н., профессор, НИТУ МИСИС, г. Москва
А. А. Бродов, к.экон.н., ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П. Бардина», г. Москва
Е. П. Вольнкина, д.т.н., советник, ОЮЛ «Кузбасская Ассоциация переработчиков отходов», г. Новокузнецк
С. М. Горбатюк, д.т.н., профессор, НИТУ МИСИС, г. Москва
К. В. Григорович, академик РАН, д.т.н., ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва
В. Е. Гролов, д.ф.-м.н., профессор, СибГИУ, г. Новокузнецк
А. Н. Дмитриев, д.т.н., профессор, академик РАЕН, академик АИН РФ, г. Екатеринбург
А. В. Дуб, д.т.н., профессор, ЗАО «Наука и инновации», г. Москва
В. И. Жучков, д.т.н., профессор, ИМЕТ УрО РАН, г. Екатеринбург
Р. Ф. Зингер, д.т.н., профессор, Институт Фридриха-Александра, Германия
М. Зиниград, д.т.н., профессор, Институт Ариэля, Израиль
В. И. Золотухин, д.т.н., профессор, ТулГУ, г. Тула
А. Г. Колмаков, д.т.н., чл.-корр. РАН, ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва
В. М. Колокольцев, д.т.н., профессор, МГТУ им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск
М. В. Костина, д.т.н., ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва
К. Л. Косырев, д.т.н., профессор, АО «НПО «ЦНИИТМаш», г. Москва
Ю. А. Курганова, д.т.н., профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
Х. Линн, ООО «Линн Хай Терм», Германия
В. И. Лысак, академик РАН, д.т.н., профессор, ВолгГТУ, г. Волгоград

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

Главный редактор:

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

Заместитель главного редактора:

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

Издатель:

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Адреса подразделений редакций:

в Москве

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

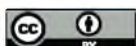
в Новокузнецке

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

В. П. Мешалкин, академик РАН, д.т.н., профессор, РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва
Р. Р. Мулюков, д.ф.-м.-н., профессор, чл.-корр. ФГБУН ИПСМ РАН, г. Уфа
С. А. Никулин, д.т.н., профессор, чл.-корр. РАЕН, НИТУ МИСИС, г. Москва
А. Х. Нурумгалиев, д.т.н., профессор, КГИУ, г. Караганда, Республика Казахстан
О. И. Островский, д.т.н., профессор, Университет Нового Южного Уэльса, Сидней, Австралия
Л. Пиетрелли, д.т.н., Итальянское национальное агентство по новым технологиям, энергетике и устойчивому экономическому развитию, Рим, Италия
И. Ю. Пышминцев, д.т.н., РосНИТИ, г. Челябинск
А. И. Рудской, академик РАН, д.т.н., профессор, СПбПУ Петра Великого, г. Санкт-Петербург
Б. А. Сивак, к.т.н., профессор, АО АХК «ВНИИМЕТМАШ», г. Москва
Л. М. Симонян, д.т.н., профессор, НИТУ МИСИС, г. Москва
Л. А. Смирнов, академик РАН, д.т.н., профессор, ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург
С. В. Солодов, к.т.н., НИТУ МИСИС, г. Москва
Н. А. Спирин, д.т.н., профессор, УрФУ, г. Екатеринбург
Г. Танг, Институт перспективных материалов университета Циньхуа, г. Шеньжень, Китай
М. В. Темлянецев, д.т.н., профессор, СибГИУ, г. Новокузнецк
М. Р. Филонов, д.т.н., профессор, НИТУ МИСИС, г. Москва
И. В. Чуманов, д.т.н., профессор, ЮУрГУ, г. Челябинск
О. Ю. Шешуков, д.т.н., профессор, УрФУ, г. Екатеринбург
М. О. Шпайдель, д.ест.н., профессор, Швейцарская академия материаловедения, Швейцария
А. Б. Юрьев, д.т.н., ректор, СибГИУ, г. Новокузнецк
В. С. Юсупов, д.т.н., профессор, ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, г. Москва

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

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



Статьи доступны под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

IZVESTIYA FERROUS METALLURGY

www.fermet.misis.ru

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

Alternative title:

Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya

Founders:



Editorial Board:

Editor-in-Chief:

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

Deputy Editor-in-Chief:

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

Publisher:

National University of Science and Technology "MISIS"

Editorial Office Address:

in Moscow

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

in Novokuznetsk

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

German V Ashikhmin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., JSC "Institute Tsvetmetobrabotka", Moscow

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

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

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

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

Andrei N. Dmitriev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician, RANS, A.M. Prokhorov Academy of Engineering Sciences, Institute of Metallurgy, Ural Branch of RAS, Ural Federal University, Yekaterinburg

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Linn Horst, Linn High Therm GmbH, Hirschbach, Germany

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ekaterina P Volynkina, Dr. Sci. (Eng.), Advisor, ALE "Kuzbass Association of Waste Processors", Novokuznetsk

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

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

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

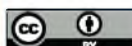
Michael Zinigrad, Dr. Sci. (Physical Chemistry), Prof., Rector, Ariel University, Israel

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

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

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

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



Articles are available under **Creative Commons Attribution 4.0 License**.

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Шакиров М.К., Протопопов Е.В., Зимин А.В., Турчанинов Е.Б.** Прогнозирование содержания углерода в металле заключительного периода продувки в кислородном конвертере с использованием нейросети 638
- Уманский А.А., Байдин В.В., Симачев А.С., Думова Л.В., Сафонов С.О.** Исследования процессов формирования микроструктуры мелющих шаров из рельсовой стали в зависимости от параметров закалочной среды 645
- Вусихис А.С., Леонтьев Л.И., Чесноков Ю.А.** Оценка эффективности электроплавки металлизированного сидеритового концентрата 653

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Почивалов Ю.И.** Структура и свойства малолегированной стали 10Г2ФБЮ после прокатки в рельефных валках в условиях электропластичности 659
- Ефимов М.О., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Шлярова Ю.А., Панченко И.А.** Анализ зоны контакта системы «покрытие/подложка», подвергнутой облучению импульсным электронным пучком 666
- Данилов В.И., Орлова Д.В., Горбатенко В.В., Данилова Л.В.** Процессы Людера и Портевена–Ле Шателля в аустенитно-мартенситной TRIP-стали 673
- Зоря И.В., Поletaev Г.М., Ракитин Р.Ю.** Теоретическая прочность аустенита при наличии в кристалле поры или вакансий: молекулярно-динамическое исследование 681
- Яреско С.И., Гусева Г.В., Щербakov В.И., Казакевич П.В.** Структура и износные характеристики чугуна после лазерной модификации поверхности ... 688
- Дмитриев А.Н., Смирнова В.Г., Вязникова Е.А., Витькина Г.Ю., Смирнов А.С.** Влияние структуры неофлюсованных обожженных титаномagnetитовых окатышей на их прочность при статическом сжатии 696
- Башенко Л.П., Почетуха В.В., Михайличенко Т.А.** Влияние отпуска на структуру наплавленных покрытий из быстрорежущей стали 705
- Власов И.В., Гордиенко А.И., Кузнецова А.Е., Семенчук В.М.** Исследование структуры и анизотропии механических свойств стального изделия, полученного методом послойной электродуговой проволоочной 3D-печати 709
- Крыжевич Д.С., Корчуганов А.В., Зольников К.П.** Взаимодействие трещины с границей зерен в бикристаллах железа 718

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- Shakirov M.K., Protopopov E.V., Zimin A.V., Turchaninov E.B.** Prediction of carbon content in the metal of final blow period in BOF using neural network 638
- Umanskii A.A., Baidin V.V., Simachev A.S., Dumova L.V., Safonov S.O.** Formation of microstructure in rail steel grinding balls depending on quenching medium parameters 645
- Vusikhis A.S., Leont'ev L.I., Chesnokov Yu.A.** Evaluating the efficiency of metallized siderite concentrate electric melting 653

MATERIALS SCIENCE

- Pochivalov Yu.I.** Structure and properties of low-alloy steel 10G2FBYu after rolling in embossed rolls under conditions of electroplasticity 659
- Efimov M.O., Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Shlyarova Yu.A., Panchenko I.A.** Analysis of contact zone of coating-substrate system exposed to irradiation with a pulse electron beam 666
- Danilov V.I., Orlova D.V., Gorbatenko V.V., Danilova L.V.** Lüders and Portevin–Le Chatelier processes in austenitic-martensitic TRIP steel 673
- Zorya I.V., Poletaev G.M., Rakitin R.Yu.** Theoretical strength of austenite in the presence of a pore or vacancies in the crystal: molecular dynamics study 681
- Yares'ko S.I., Guseva G.V., Shcherbakov V.I., Kazakevich P.V.** Structure and wear characteristics of cast iron after laser surface modification 688
- Dmitriev A.N., Smirnova V.G., Vyaznikova E.A., Vit'kina G.Yu., Smirnov A.S.** Effect of structure of unfluxed burnt titanomagnetite pellets on strength under static compression 696
- Bashchenko L.P., Pochetukha V.V., Mikhailichenko T.A.** Influence of tempering on structure of deposited high-speed steel coatings 705
- Vlasov I.V., Gordienko A.I., Kuznetsova A.E., Semenchuk V.M.** Structure and mechanical properties anisotropy of a steel product manufactured by layer-by-layer electric arc wire 3D printing 709
- Kryzhevich D.S., Korchuganov A.V., Zol'nikov K.P.** Interaction of cracks with grain boundaries in iron biccystals 718

СОДЕРЖАНИЕ (продолжение)

CONTENTS (Continuation)

Спиридонова К.В., Литовченко И.Ю., Полехина Н.А.,
Линник В.В., Борисенко Т.А., Чернов В.М., Ле-
онтьева-Смирнова М.В. Структурно-фазовые
превращения 12 % хромистой ферритно-мартен-
ситной стали ЭП-823 725

Spiridonova K.V., Litovchenko I.Yu., Polekhina N.A.,
Linnik V.V., Borisenko T.A., Chernov V.M.,
Leont'eva-Smirnova M.V. Structural-phase transfor-
mations of 12 % chromium ferritic-martensitic steel
EP-823 725

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

**INNOVATIONS IN METALLURGICAL
INDUSTRIAL AND LABORATORY
EQUIPMENT, TECHNOLOGIES
AND MATERIALS**

Одиноков В.И., Евстигнеев А.И., Дмитриев Э.А.,
Карпенко В.А. Моделирование нового процесса
перемешивания жидкого металла в кристаллизато-
ре установки непрерывной разливки стали при вра-
щающейся рубашке с вертикальными ребрами 733

Odinokov V.I., Evstigneev A.I., Dmitriev E.A., Karpen-
ko V.A. Simulation of a new process of mixing liquid
metal in CCM mold with rotating cooling jacket with
vertical ribs 733

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

**PHYSICO-CHEMICAL BASICS
OF METALLURGICAL PROCESSES**

Бабенко А.А., Шартдинов Р.Р., Уполовникова А.Г.,
Сметанников А.Н., Лобанов Д.А., Долматов А.В.
Влияние основности на физические свойства шла-
ков системы $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - 18\% \text{Cr}_2\text{O}_3 - 6\% \text{B}_2\text{O}_3 -$
 $- 3\% \text{Al}_2\text{O}_3 - 8\% \text{MgO}$ 743

Babenko A.A., Shartdinov R.R., Upolovnikova A.G.,
Smetannikov A.N., Lobanov D.A., Dolmatov A.V.
Influence of basicity on physical properties of slags of
the $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - 18\% \text{Cr}_2\text{O}_3 - 6\% \text{B}_2\text{O}_3 - 3\% \text{Al}_2\text{O}_3 -$
 $- 8\% \text{MgO}$ system 743

**ПО МАТЕРИАЛАМ
МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ ШКОЛА
ДЛЯ МОЛОДЫХ МЕТАЛЛУРГОВ»**

**BASED ON THE MATERIALS
OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE
“SCIENTIFIC AND PRACTICAL SCHOOL FOR
YOUNG METALLURGISTS”**

Гаманюк С.Б., Руцкий Д.В., Зюбан Н.А., Кирил-
чев М.В., Никитин М.С. Физическое моделирова-
ние влияния доливки расплава в прибыльную часть
слитка на процесс затвердевания и структурообра-
зование 750

Gamanyuk S.B., Rutsikii D.V., Zyuban N.A., Kirili-
chev M.V., Nikitin M.S. Physical modeling of the effect
of refilling the melt into an ingot knock-off head on so-
lidification and structure formation 750

Аксенова В.В., Павлов А.В., Марков Г.М. Получение
рафинировочных глиноземсодержащих флюсов ме-
тодом спекания из техногенного сырья 760

Aksenova V.V., Pavlov A.V., Markov G.M. Production of
refining alumina containing fluxes by sintering from
technogenic raw materials 760

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И АВТОМАТИЗАЦИЯ
В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

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

Соломонов К.Н., Тищук Л.И., Горбатьюк С.М., Снит-
ко С.А., Чиченева О.Н. Моделирование картины
течения металла при формообразовании поковки из
плоской заготовки 768

Solomonov K.N., Tishchuk L.I., Gorbatyuk S.M., Snit-
ko S.A., Chicheneva O.N. Modeling the pattern of
metal flow during forming of forgings from a flat billet ... 768

Указатель статей, помещенных в 2023 г., том 66 775

Index of articles “Izvestiya. Ferrous Metallurgy” for
2023, vol. 66 775



УДК 669.1:001.89

DOI 10.17073/0368-0797-2023-6-638-644

Оригинальная статья
Original article

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА В МЕТАЛЛЕ ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОГО ПЕРИОДА ПРОДУВКИ В КИСЛОРОДНОМ КОНВЕРТЕРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

М. К. Шакиров[✉], Е. В. Протопопов, А. В. Зимин, Е. Б. Турчанинов

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

✉ shakirov.maxim@mail.ru

Аннотация. Прогнозирование и управление содержанием углерода в металле по окончании продувки в кислородном конвертере являются ключевыми моментами в обеспечении эффективности производства стали. Наиболее точным методом является метод динамического прогнозирования, основанный на использовании информации промежуточного замера фурмой-зондом (блок типа TSC) в период израсходования порядка 85 – 90 % общего расхода кислорода на плавку и принятой модели заключительного периода продувки. Для прогнозирования традиционно используются модели заключительного периода на основе экспоненциальных или кубических функций. Существуют разработки на основе нейросетевых технологий. В настоящем исследовании заключительный период плавки определили как период между первым и последним (перед выпуском плавки) замерами фурмой-зондом. В зависимости от результатов первого замера и требуемых параметров металла в этот период может производиться продувка кислородом, присадка флюсов, а также усреднительная продувка азотом. Была исследована возможность использования нейросети для прогнозирования конечного содержания углерода с использованием результатов промежуточного замера фурмой-зондом (блок типа TSO) в период израсходования порядка 95 % общего расхода кислорода на плавку. В качестве модели заключительного периода была программно реализована двухслойная нейросеть с одним скрытым слоем и активационной функцией типа Softplus для всех нейронов. Входные данные - содержание углерода промежуточного замера и расход кислорода на заключительный период продувки. Выходные данные – прогнозируемое конечное содержание углерода. Для обучения использовались данные по фактическому конечному содержанию углерода в металле. Нейронная сеть была настроена по данным 700 плавков обучающей выборки. Настроенная таким образом модель была дополнительно протестирована на данных 232 плавков, не использовавшихся при обучении. Получены близкие значения ошибок прогноза для обучающей и тестирующей выборок. Кроме того, полученные значения ошибок сопоставимы с изменениями содержания углерода для плавков без использования кислорода в заключительный период, что говорит о высокой точности прогноза.

Ключевые слова: кислородный конвертер, содержание углерода, измерительная фурма, математическое моделирование, прогнозирование, заключительный период, нейронная сеть

Для цитирования: Шакиров М.К., Протопопов Е.В., Зимин А.В., Турчанинов Е.Б. Прогнозирование содержания углерода в металле заключительного периода продувки в кислородном конвертере с использованием нейронной сети. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023;66(6):638–644. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-6-638-644>

PREDICTION OF CARBON CONTENT IN THE METAL OF FINAL BLOW PERIOD IN BOF USING NEURAL NETWORK

M. K. Shakirov[✉], E. V. Protopopov, A. V. Zimin, E. B. Turchaninov

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

✉ shakirov.maxim@mail.ru

Abstract. Prediction and control of the carbon content after the end of oxygen blow in BOF converter are key points of steel production efficiency. One of the most accurate methods is the dynamic predicting method based on the use of intermediate substance measurement (TSC probe) when about 85 – 90 % of total oxygen is consumed and on the final period model. Models of the final period are traditionally based on exponential or cubic functions, currently there are developments based on neural network technologies. We investigated the possibility of using a neural network to predict the final carbon content using the results of intermediate substance measurement (TSO probe) when about 95 % of total oxygen is consumed. As a model of the final period, a two-layer neural network with one hidden layer and an activation function of the Softplus type for all neurons was

implemented in software. The input vectors contain initial carbon content and oxygen consumption for the second blow values. The output vector contains the predicted final carbon content, the output training vector - actual final carbon content values. The network was trained on 700 heats data of the training set. The model trained in this way was tested on 232 heats data of the testing set. The prediction errors distribution and values of the mean absolute error and root mean square error for the training and testing sets are correspondingly close. They are also comparable with similar indicators of the heats, the final period of which was carried out without oxygen blow (only flux additions and/or nitrogen blow), and this indicates a high accuracy of the prediction.

Keywords: BOF, carbon content, substance, mathematical simulation, prediction, final period, neural network

For citation: Shakirov M.K., Protopopov E.V., Zimin A.V., Turchaninov E.B. Prediction of carbon content in the metal of final blow period in BOF using neural network. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(6):638–644. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-6-638-644>

ВВЕДЕНИЕ

Накопленный опыт эксплуатации конвертеров с верхней кислородной продувкой убедительно доказал преимущества процесса, к которым можно отнести высокую производительность, достаточно высокую стойкость футеровки агрегатов, простоту конструкции и эксплуатации оборудования, технологическую гибкость по составу перерабатываемых чугунов [1–3]. В то же время получение стабильных технологических показателей плавки и эффективность реализации процесса в целом в значительной степени зависят от правильности и точности определения момента окончания операции [4]. В практике организации продувки для решения такой задачи, как правило, используются косвенные характеристики особенностей хода продувки и поведения ванны, например:

- определение момента окончания операции продувки по количеству израсходованного кислорода;
- интенсивность светимости факела отходящих газов над конвертером;
- анализ химического состава отходящих газов;
- анализ изменения косвенных характеристик: контроль поведения ванны (акустические явления, вибрация фурмы), контроль температуры охлаждающей фурмы воды, электропроводности ванны и т.д.

При этом перечисленные элементы и способы управления процессом продувки можно отнести к субъективным факторам при условии обеспечения высокой компетентности технологического персонала. В то же время высокая скорость процессов окислительного рафинирования, протекающих в кислородном конвертере, интенсивное пыле- и газовыделение, изменяющийся уровень ванны с возможным образованием выбросов или, наоборот, сворачиванием шлака – все эти перечисленные факторы значительно затрудняют возможности управления плавкой.

Особое значение исследуемые прогнозирующие модели приобретают при производстве специальных сталей, в том числе особо низкоуглеродистых сталей (в том числе беспримесных со свободными междуузлиями ($\leq 0,003\%$ C и $0,004\%$ N)). В связи с этим точное прогнозирование и управление содержанием углерода в металле на заключительном этапе операции продувки является чрезвычайно актуальной задачей, решение которой позволяет повысить и стабилизировать показатели технологии.

На основании дополнительно получаемой информации, использующейся для прогнозирования характеристик плавки, можно выделить следующие известные методы расчетного определения остаточного содержания углерода в металле перед выпуском [4; 5]:

- прогнозирование с использованием статических моделей;
- прогнозирование с использованием динамических моделей;
- интеллектуальное прогнозирование.

1. Статическое прогнозирование

Для статического прогнозирования используются так называемые статические модели плавки, основанные на расчетах теплового и материального балансов, либо на статистическом описании плавки в целом. Исходными данными служат химический состав и температура чугуна, химический состав твердой металлозавалки и добавочных материалов, а также результаты предшествующих плавов и требуемые значения показателей металла по окончании продувки: прежде всего химического состава и температуры. Данный метод позволяет определять количество шихтовых и добавочных материалов, в том числе оценивать израсходованное в период продувки количество кислорода, необходимое для достижения требуемого содержания углерода в металле [6–8]. Однако точность этого метода в отношении прогнозирования параметров плавки по окончании продувки недостаточно стабильна ввиду влияния большого количества неконтролируемых факторов [9]. К таким факторам можно отнести: изменяющийся химический состав и физические свойства металлозавалки, колебания свойств и количества добавочных материалов, неконтролируемые потери тепла, потери кислорода в различные периоды продувки и т.д. [7]. Наиболее часто для статического прогнозирования используются теоретические [10–12] или статические [13–15] модели, в том числе модели, основанные на нейронных сетях.

2. Динамическое прогнозирование

Известно, что использование фурмы-зонда в сочетании с моделями заключительного периода продувки является инструментом динамического управления,

позволяющим уменьшить цикл плавки за счет значительного уменьшения затрат времени на корректирующие операции (повалка, охлаждение металла) [15]. Модели заключительного периода основываются на статистическом описании зависимостей между конечными значениями параметров плавки (прежде всего содержание углерода и температура), их исходными значениями и количеством израсходованного кислорода [16]. При этом скорость обезуглероживания может быть описана как

$$-\frac{\partial C}{\partial \tau} = k(C - C_0), \quad (1)$$

где k – константа скорости реакции обезуглероживания, с^{-1} ; C – текущая концентрация углерода в жидком металле, %; C_0 – минимально достижимая концентрация углерода в жидком металле, характеризующая массообмен и скорость окисления углерода в области его низких значений, %; τ – продолжительность продувки кислородом, с.

Фурма-зонд позволяет проводить измерения и отбор проб металла для химического анализа без проведения так называемой повалки, сопровождающейся прерыванием кислородной продувки и наклоном конвертера. В данном случае для каждой плавки проводится, как правило, два измерения: по ходу кислородной продувки (после израсходования 85 – 90 % предполагаемого общего количества кислорода) и по окончании продувки кислородом. Первое измерение проводится с использованием блоков типа TSC (*temperature, sample, carbon*): определяются температура металла, содержание в нем углерода по температуре ликвидуса расплава и отбирается проба. При этом в период измерения интенсивность продувки кислородом снижается для повышения достоверности получаемых результатов. На основании данных первого, «динамического», замера модель заключительного периода рассчитывает количество кислорода и возможное количество охладителя, необходимые для достижения заданных значений температуры и содержания углерода металла перед выпуском плавки.

По окончании продувки кислородом измерение проводится с использованием блоков типа TSO (*temperature, sample, oxygen*): определяется температура металла, его окисленность, рассчитывается содержание углерода, проводится отбор пробы металла.

Однако в отечественных конвертерных цехах блоки типа TSC на текущий момент не применяются, измерения проводятся с использованием блоков типа TSO в период продувки, соответствующий более низкому (менее 0,15 %) содержанию углерода в металле.

Использование измерительной фурмы-зонда позволяет устранить влияние колебаний свойств шихтовых материалов и увеличить точность прогнозирования конечного содержания углерода для конвертерной

плавки по сравнению со статическими методами прогнозирования. Некоторые японские производители достигли точности прогнозирования в данных условиях свыше 90 % в интервале $\pm 0,02$ % С [17].

Другой разновидностью метода динамического прогнозирования содержания углерода является подход, основанный на использовании косвенных показателей процесса обезуглероживания, например, результатов анализа состава отходящих газов. Главным недостатком такого варианта, наряду с влиянием на результаты анализа количества подсасываемого воздуха из атмосферы в режиме работы газоотводящего тракта с частичным дожиганием отходящих газов, является запаздывание (задержка по времени) исходной информации для расчета.

3. Интеллектуальное прогнозирование

Интеллектуальное прогнозирование содержания углерода в расплаве, в соответствии с вышеперечисленными особенностями, подразумевает использование дополнительной, так называемой косвенной информации о ходе процесса, например, по вибрации кислородной фурмы, уровню шлакометаллической эмульсии, акустическим характеристикам хода продувки и т.д.

К первому опыту использования такого подхода можно отнести разработку модели заключительного периода продувки на основе нейронной сети [18]. В частности, для прогнозирования содержания углерода используется сеть, входные нейроны которой соответствуют содержанию углерода по замеру фурмы-зонда, количеству кислорода и охладителя, израсходованных именно в заключительный период. Полученные положительные результаты позволяют сделать выводы об эффективности использованного метода.

Развитие и использование таких подходов дополнительно показывают преимущества прогнозирования содержания углерода в заключительный период продувки с использованием нейросетей по сравнению с экспоненциальной, кубической моделями и моделью окисления углерода, основанными на анализе химического состава отходящих газов. При этом выполненные исследования были проведены с использованием экспериментальных данных промежуточных замеров только блоками типа TSC [17; 19 – 21].

Таким образом, актуальными представляются оценки применимости нейронных сетей для описания заключительного периода продувки, в частности, для прогнозирования конечного содержания углерода в металле на основе данных промежуточных замеров применяемыми в отрасли блоками типа TSO.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящем исследовании заключительный период продувки определили как условный период между пер-

вым и последним (перед выпуском плавки) замерах фурмой-зондом. В зависимости от результатов первого замера и требуемых конечных параметров металла в этот период могут проводиться продувка кислородом, присадка флюсов, а также усреднительная продувка азотом.

Задачами исследования являлись определение точности прогноза конечного содержания углерода в металле с использованием данных промежуточного замера блоками типа TSO по израсходованию порядка 95 % предполагаемого общего количества кислорода на плавку, а также сравнение полученных результатов с аналогичными, полученными для технологии с использованием блоков типа TSC.

В качестве анализируемых использовали данные плавки текущего производства, проведенных в 350-т конвертере, оборудованном измерительной фурмой под непосредственным контролем авторов.

Для обучения и тестирования прогноза содержания углерода были отобраны плавки с использованием в заключительный период только продувки кислородом.

Исходное содержание углерода – определенное по результатам замера фурмой-зондом перед началом заключительного периода, конечное – по результатам химического анализа пробы металла, отобранной фурмой-зондом по окончании продувки. Исходное (C_1) и конечное (C_2) содержание углерода, а также изменение концентрации углерода в результате проведения заключительного периода ($\Delta C^{зн} = C_2 - C_1$) и расход кислорода на операцию приведены в табл. 1 (в числителе – диапазон изменения, в знаменателе – среднее значение).

Для прогнозирования содержания углерода по окончании заключительного периода продувки использовали двухслойную нейронную сеть, содержащую один скрытый слой. Входные данные – фактическое содержание углерода в металле перед началом заключительного периода C_1 и фактический расход кислорода в заключительный период $O_2^{зн}$. Выходные данные – прогнозируемое содержание углерода $C_2^{прог}$ в металле по окончании заключительного периода. Для обучения использовали данные по фактическому конечному содержанию углерода пробы металла. В качестве функции активации применяли функцию вида

$$Y = \ln(1 + e^x). \quad (2)$$

Т а б л и ц а 1

Параметры заключительного периода продувки с использованием кислорода

Table 1. Parameters of the final oxygen blow period

$C_1, \%$	$C_2, \%$	$\Delta C^{зн}, \%$	$O_2^{зн}, \text{НМ}^3$
0.026 – 0.168	0.017 – 0.117	0 – 0.099	411 – 4012
0,055	0,039	0,016	1156

Данные по исходному и конечному содержанию углерода, расходу кислорода предварительно подвергали нормированию в соответствии с выражением

$$C_i^* = \frac{C_i - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}}, \quad (3)$$

где C_i – фактическое значение параметра; C_{\min} и C_{\max} – минимальное и максимальное значения параметра.

В качестве обучающей выборки использовали данные 700 плавки. Результаты обучения тестировали по данным 232 плавки, следовавших в хронологическом порядке за плавками обучающей выборки, из них 56 плавки были проведены под непосредственным контролем авторов.

Для обучения сети применяли алгоритм обратного распространения ошибки – метод градиентного спуска. В процессе обучения минимизировалось значение суммы квадратов отклонений между фактическим C_2 и прогнозируемым $C_2^{прог}$ содержанием углерода в металле.

Оценку точности прогнозирования проводили с использованием следующих показателей:

– средняя ошибка (*mean error*), определяемая в соответствии с выражением

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i), \quad (4)$$

где N – количество наблюдений; Y_i, \hat{Y}_i – фактическое и прогнозируемое значения параметра;

– среднемодульная ошибка (*mean absolute error*), определяемая в соответствии с выражением:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Y_i - \hat{Y}_i|, \quad (5)$$

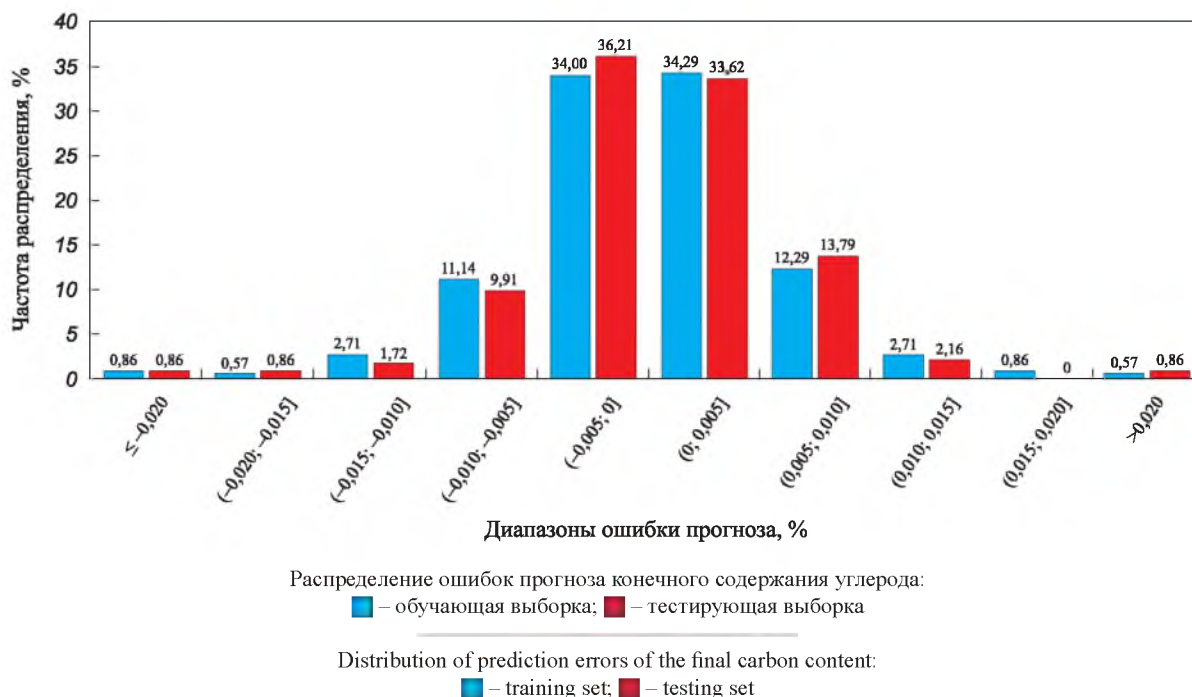
– среднеквадратичная ошибка (*root mean square error*), определяемая в соответствии с выражением

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}. \quad (6)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате обучения и последующего тестирования нейросети на соответствующих массивах экспериментальных данных получено распределение ошибок прогноза конечного содержания углерода в металле $C_2 - C_2^{прог}$ (см. рисунок).

Для тестирующей выборки получено распределение ошибки прогноза, близкое к таковой для обучающей выборки. Попадание свыше 90 % ошибки в диапазон $\pm 0,010 \%$ и порядка 70 % плавки в диапазон $\pm 0,005 \%$ свидетельствует о достаточно высокой точности прогноза конечного содержания углерода в металле.



Для сравнения достигнутые показатели точности прогноза по обучающей и тестирующей выборкам сопоставили с аналогичными показателями плавков без использования кислорода в заключительный период продувки. Для сравнительных плавков в данный период проводили присадки извести и/или известняка, усреднительную продувку азотом осуществляли через кислородную фурму. В качестве прогнозируемых значений конечного содержания углерода $C_2^{прог}$ использовали исходные значения C_1 по результатам первого замера фурмы-зонда (табл. 2). Показатели точности рассчитывали в соответствии с выражениями (4) – (6).

Таким образом, показатели, характеризующие точность прогноза для плавков обучающей и тестирующей выборок, имеют близкие значения. В то же время эти значения сопоставимы с таковыми для плавков, проведенных без использования кислорода в заключительный период. Изменения содержания углерода ($C_2 - C_1 = C_2 - C_2^{прог}$) для таких плавков связаны, очевидно, с неоднородностью химического состава по объему металлической ванны. То есть полученные данные (табл. 2) позволяют сделать вывод, что достиг-

нутая точность прогноза сопоставима с изменениями содержания углерода в металле, связана с неоднородностью ванны и, возможно, погрешностью определения содержания углерода при замере фурмой-зондом. Точность прогноза предложенной модели заключительного периода в диапазонах $\pm 0,005$ и $\pm 0,010$ % для тестирующей выборки составила соответственно 70 и 94 %.

Авторы работы [22] показали для технологии с использованием блоков типа TSC, что модель заключительного периода, основанная на нейронной сети, позволяет достичь попадания ошибки прогноза по содержанию углерода в металле в диапазоны $\pm 0,005$, $\pm 0,010$, $\pm 0,015$ и $\pm 0,020$ %, что соответствует 25, 54, 71 и 91 % случаев. Выполненный анализ показывает, что данные показатели превосходят аналогичные для экспоненциальной, кубической моделей и модели окисления углерода, основанной на анализе химического состава отходящих газов. Однако следует отметить, что в данном случае среднее исходное значение содержания углерода составляло 0,244 %, что значительно превышает таковое для настоящего исследования.

Таблица 2

Сравнение показателей плавков обучающей, тестирующей выборок и плавков без использования кислорода в заключительный период

Table 2. Comparison of parameters of training, testing sets and heats without oxygen in the final period

Выборка	Количество плавков	ME, %	MAE, %	RMSE, %
Обучающая выборка	700	$-1,36 \cdot 10^{-7}$	0,0044	0,0060
Тестирующая выборка	232	$-1,09 \cdot 10^{-5}$	0,0043	0,0060
Без использования O_2	330	$2,53 \cdot 10^{-4}$	0,0040	0,0048

Для оптимизации получаемых результатов в дальнейшем возможно исследование вариантов и эффекта обновления обучающей выборки с целью адаптации модели к изменяющимся по ходу кампании конвертера условиям.

Выводы

Точное прогнозирование при определении содержания углерода в металле является ключевым для управления заключительным периодом плавки в кислородном конвертере. Результаты выполненного исследования подтверждают результаты работ [21; 22] и позволяют говорить о возможности применения нейронной сети для прогнозирования содержания углерода в металле заключительного периода продувки в кислородном конвертере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Лякишев Н.П., Шалимов А.Г. *Сравнительная характеристика состояния кислородно-конвертерного производства стали в России и за рубежом*. Москва: Элиз; 2000:64.
2. *Технология производства стали в современных конвертерных цехах* / С.В. Колпаков, Р.В. Старов, В.В. Смоктей, В.И. Лебедев, В.В. Рябов. Москва: Машиностроение; 1991:464.
3. Афонин С.З. Современное состояние, перспективы и задачи стоящие перед металлургической промышленностью России. *Сталь*. 1995;(7):1–4.
Afonin S.Z. Current state, prospects and challenges facing the metallurgical industry of Russia. *Stal'*. 1995;(7):1–4. (In Russ.).
4. Бапгизманский В.И. *Теория кислородно-конвертерного процесса*. Москва: Металлургия; 1975:375.
5. Бапгизманский В.И., Меджибожский М.Я., Охотский В.Б. *Конвертерные процессы производства стали*. Киев-Донецк: Вища школа; 1984:344.
6. Туркенич Д.И. *Управление плавкой стали в конвертере*. Москва: Металлургия; 1971:360.
7. Бойченко Б.М., Низяев К.Г., Стоянов А.Н., Молчанов Л.С., Синегин Е.В. Параметризация процесса выплавки стали в кислородном конвертере. *Системные технологии*. 2017;(3(110)):10–15.
Boichenko B.M., Nizyaev K.G., Stoyanov A.N., Molchanov L.S., Sinegin E.V. Parametrization of steel production in an oxygen converter. *Sistemnye Tekhnologii*. 2017;(3(110)):10–15. (In Russ.).
8. Бигеев А.М. *Математическое описание и расчеты сталеплавильных процессов*. Москва: Металлургия; 1982:160.
9. Wang Z., Xie F., Wang B., Liu Q., Lu X.C., Hu L.N., Cai F. The control and prediction of end-point phosphorus content during BOF steelmaking process. *Steel Research International*. 2014;85(4):599–606.
<https://doi.org/10.1002/srin.201300194>
10. Мочалов С.П., Айзатулов Р.С., Шакиров К.М. Прогнозирующая динамическая модель конвертерного процесса. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1979;22(4):128–131.
Mochalov S.P., Aizatulov R.S., Shakirov K.M. Predicting dynamic model of converter process. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1979;22(4):128–131. (In Russ.).
11. Chen J.D., Zhang C.J., Feng J.H. Static mechanics model in loading converter and energy saving. *Journal of Hebei Institute of Technology*. 2007;29(1):32–35.
12. Рожков И.М., Травин О.В., Туркенич Д.И. *Математические модели конвертерного процесса*. Москва: Металлургия; 1978:184.
13. Pal J., Singh S., Ghose A.K., Mohan S. A mathematical model for end point control of basic oxygen steel making furnace. *Journal of Metallurgy and Materials Science*. 2002;44(1):39–49.
14. Cunha A.P., Pacianotto T.A., Frottini Fileti A.M. Steelmaking process: neural models improve end-point predictions. *Computer Aided Chemical Engineering*. 2004;18(4):631–636.
[https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(04\)80171-8](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(04)80171-8)
15. Apeldoorn G.J., Gootjes P. Sublances for BOF steelmaking. In: *Millennium Steel*. 2006;97–101.
16. Бигеев А.М., Байтман В.В. Адаптация математической модели окончания продувки конвертерной плавки к условиям кислородно-конвертерного цеха Магнитогорского металлургического комбината. *Металлургия*. 2006;(9):47–49.
Bigeev A.M., Baitman V.V. Adaptation of mathematical model of BOF blowing end to conditions of BOF shop of Magnitogorsky Iron and Steel Works. *Metallurg*. 2006;(9):47–49. (In Russ.).
17. Vortrefflich W., Vries J. Maximizing BOF production capacity and producing cost efficient by using sublance based process control. *Iron & Steel Review*. 2010;10:94–100.
18. Кошелев А.Е., Воронин Н.И., Петрунин М.В., Киселева Т.В., Турчанинов Е.Б. О косвенном контроле содержания углерода в конвертерной ванне. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1981;24(12):105–110.
Koshelev A.E., Voronin N.I., Petrunin M.V., Kiseleva T.V., Turchaninov E.B. On indirect control of carbon content in converter bath. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1981;24(12):105–110. (In Russ.).
19. Wu M., Wu F. Application of using dynamic control with off-gas analysis for making medium-high carbon steel. *Iron and Steel*. 2007;42(12):38–41.
20. *Способы расчета масс материалов конвертерного производства* / В.П. Авдеев, Р.С. Айзатулов, Л.П. Мышляев, М.В. Петрунин, Ю.А. Сарapultов. Москва: Металлургия; 1994:192.
21. Jun T., Xin W., Tianyou C., Shuming X. Intelligent control method and application for BOF steelmaking process. *IFAC Proceedings Volumes*. 2002;35(1):439–444.
<https://doi.org/10.3182/20020721-6-ES-1901.00726>
22. Gu M., Xu A., Wang H., Wang Z. Real-time dynamic carbon content prediction model for second blowing stage in BOF based on CBR and LSTM. *Processes*. 2021;9(11):1987.
<https://doi.org/10.3390/pr9111987>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Максим Кимович Шакиров, к.т.н., доцент кафедры автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0009-0007-4938-5975
E-mail: shakirov.maxim@mail.ru

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

Алексей Валерьевич Зимин, д.т.н., заведующий кафедрой автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0002-0485-9846
E-mail: zimin.0169@yandex.ru

Евгений Борисович Турчанинов, к.т.н., доцент кафедры автоматизации и информационных систем, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: evgen52.turchaninov@gmail.com

Maksim K. Shakirov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof of the Chair of Automation and Information Systems, Siberian State Industrial University
ORCID: 0009-0007-4938-5975
E-mail: shakirov.maxim@mail.ru

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

Aleksei V. Zimin, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Chair of Automation and Information Systems, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0002-0485-9846
E-mail: zimin.0169@yandex.ru

Evgenii B. Turchaninov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof of Chair of Automation and Information Systems, Siberian State Industrial University
E-mail: evgen52.turchaninov@gmail.com

Вклад авторов

Contribution of the Authors

М. К. Шакиров – постановка задач исследования, разработка и реализация алгоритма, анализ полученных результатов.
Е. В. Протопопов – технологическое описание поставленной задачи, обоснование направления исследований, анализ полученных результатов.
А. В. Зимин – постановка проблемы, формирование выводов.
Е. Б. Турчанинов – постановка задач исследования, анализ данных.

M. K. Shakirov – statement of the research tasks, development and realization of the algorithm, analysis of the results.
E. V. Protopopov – technological description of the task, justification of the research direction, analysis of the results.
A. V. Zimin – statement of the research tasks, formulation of conclusions.
E. B. Turchaninov – statement of the research tasks, data analysis.

Поступила в редакцию 25.04.2023
 После доработки 11.09.2023
 Принята к публикации 25.09.2023

Received 25.04.2023
 Revised 11.09.2023
 Accepted 25.09.2023