

# ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Научно-технический журнал

Издается с января 1958 г. Выпускается 6 раз в год

2024 Том 67 № 3  
Vol. No.

# IZVESTIYA FERROUS METALLURGY

Scientific and Technical Journal

Published since January 1958. Issued 6 times a year

# ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

www.fermet.misis.ru

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

## Варианты названия:

Известия вузов. Черная металлургия

Izvestiya. Ferrous Metallurgy

## Учредители:



## Редакционная коллегия:

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

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

## Главный редактор:

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

## Заместитель главного редактора:

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

## Издатель:

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

## Адреса подразделений редакции:

### в Москве

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

### в Новокузнецке

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

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

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

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



Статьи доступны под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

# IZVESTIYA FERROUS METALLURGY

www.fermet.misis.ru

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

## Alternative title:

Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya

## Founders:



## Editorial Board:

**Sailaubai O. Baisanov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Abishev Chemical-Metallurgical Institute, Karaganda, Republic of Kazakhstan  
**Vladimir D. Belov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST MISIS, Moscow  
**Anatolii A. Brodov**, Cand. Sci. (Econ.), Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy, Moscow  
**Il'ya V. Chumanov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., South Ural State Research University, Chelyabinsk  
**Andrei N. Dmitriev**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician, RANS, A.M. Prokhorov Academy of Engineering Sciences, Institute of Metallurgy, Ural Branch of RAS, Ural Federal University, Yekaterinburg  
**Aleksei V. Dub**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., JSC "Science and Innovations", Moscow  
**Mikhail R. Filonov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST MISIS, Moscow  
**Sergei M. Gorbatyuk**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST MISIS, Moscow  
**Konstantin V. Grigorovich**, Academician of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow  
**Victor E. Gromov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk  
**Aleksei G. Kolmakov**, Dr. Sci. (Eng.), Corresponding Member of RAS, Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow  
**Valerii M. Kolokol'tsev**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk  
**Mariya V. Kostina**, Dr. Sci. (Eng.), Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow  
**Konstantin L. Kosyrev**, Dr. Sci. (Eng.), Academician of RANS, Electrosteel Heavy Engineering Works JSC, Moscow  
**Yuliya A. Kurganova**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Bauman Moscow State Technical University, Moscow  
**Linn Horst**, Linn High Therm GmbH, Hirschbach, Germany  
**Vladimir I. Lysak**, Academician of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, Volgograd State Technical University, Volgograd  
**Valerii P. Meshalkin**, Dr. Sci. (Eng.), Academician of RAS, Prof., D.I. Mendeleyev Russian Chemical-Technological University, Moscow  
**Radik R. Mulyukov**, Dr. Sci. (Phys.-Chem.), Prof., Corresponding Member of RAS, Institute of Metals Superplasticity Problems of RAS, Ufa

## Editor-in-Chief:

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

## Deputy Editor-in-Chief:

**Evgenii V. Protopopov**, 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@sis.ru

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

**Sergei A. Nikulin**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member of RANS, NUST MISIS, Moscow  
**Asylbek Kh. Nurumgaliev**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Karaganda State Industrial University, Karaganda, Republic of Kazakhstan  
**Oleg I. Ostrovski**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., University of New South Wales, Sydney, Australia  
**Loris Pietrelli**, Dr., Scientist, Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development, Rome, Italy  
**Igor' Yu. Pyshmintsev**, Dr. Sci. (Eng.), Russian Research Institute of the Pipe Industry, Chelyabinsk  
**Andrei I. Rudskoi**, Academician of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg  
**Oleg Yu. Sheshukov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Ural Federal University, Yekaterinburg  
**Laura M. Simonyan**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST MISIS, Moscow  
**Robert F. Singer**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Friedrich-Alexander University, Germany  
**Boris A. Sivak**, Cand. Sci. (Eng.), Prof., VNIIMETMASH Holding Company, Moscow  
**Leonid A. Smirnov**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician of RAS, OJSC "Ural Institute of Metals", Yekaterinburg  
**Sergei V. Solodov**, Cand. Sci. (Eng.), NUST MISIS, Moscow  
**Speidel Marcus**, Dr. Natur. Sci., Prof., Swiss Academy of Materials, Switzerland  
**Nikolai A. Spirin**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Ural Federal University, Yekaterinburg  
**Tang Guo**, 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.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Калько А.А., Виноградов Е.Н., Калько О.А., Калько А.А. Разработка и внедрение технологических мероприятий по продлению кампании доменной печи № 5 ПАО «Северсталь» ..... 260

РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ  
В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

- Вейшу В., Шайлун Л., Вейхой Х., Чикова О.А., Имэн Ч. Модель энергосбережения для связанных процессов металлургии стали ..... 270

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Громов В.Е., Коновалов С.В., Ефимов М.О., Панченко И.А., Шляров В.В. Пути улучшения свойств ВЭС Cantor CoCrFeNiMn и CoCrFeNiAl ..... 283
- Костина В.С., Костина М.В., Зиновеев Д.В., Кудряшов А.Э. Расчеты фазового состава аустенитной высокоазотистой сварочной проволоки и исследование выполненного из нее сварного соединения .... 293
- Аносов М.С., Сорокина С.А., Чернигин М.А., Мордовина Ю.С. Влияние термообработки на структуру аустенитной стали 07X25Ni13, полученной методом аддитивного выращивания WAAM ..... 303
- Крыжевич Д.С., Корчуганов А.В., Зольников К.П. Миграция границ зерен и изменение механических свойств сплава Fe–10Ni–20Cr при радиационном облучении ..... 311
- Поликевич К.Б., Петелин А.Л., Плохих А.И., Фомина Л.П. Диффузия азота по границам слоев при азотировании многослойных материалов ..... 318
- Орлова Д.В., Данилов В.И., Горбатенко В.В., Данилова Л.В., Бочкарева А.В. Особенности кинетики деформационных фронтов при скачкообразной деформации Людерса в  $\alpha$ -железе при повышенной температуре ..... 325

СТАЛИ ОСОБОГО НАЗНАЧЕНИЯ

- Саулин Д.В., Кузьминых К.Г., Пойлов В.З. Определение влияния водорода на изменение микротвердости и характеристик микроструктуры образцов авиационных сплавов ..... 332
- Федоров А.С., Карасев В.С., Алексеева Е.Л., Альхименко А.А., Шапошников Н.О. Проблемы подбора коррозионностойких сталей и сплавов в нефтегазовой отрасли под условия эксплуатации ..... 340

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- Kal'ko A.A., Vinogradov E.N., Kal'ko O.A., Kal'ko A.A. Development and implementation of technological measures to extend the campaign of blast furnace No. 5 of PJSC Severstal ..... 260

RESOURCE SAVING  
IN FERROUS METALLURGY

- Weishu W., Shuailong L., Weihui X., Chikova O.A., Yimeng Z. Energy saving model for related processes in steelmaking ..... 270

MATERIALS SCIENCE

- Gromov V.E., Kononov S.V., Efimov M.O., Panchenko I.A., Shlyarov V.V. Ways to improve the properties of high-entropy alloys Cantor CoCrFeNiMn and CoCrFeNiAl ..... 283
- Kostina V.S., Kostina M.V., Zinoveev D.V., Kudryashov A.E. Calculations of the phase composition of austenitic high-nitrogen welding wire and study of a welded joint made from it ..... 293
- Anosov M.S., Sorokina S.A., Chernigin M.A., Mordovina Yu.S. Effect of heat treatment on structure of austenitic steel 07Cr25Ni13 obtained by WAAM ..... 303
- Kryzhevich D.S., Korchuganov A.V., Zolnikov K.P. Grain boundary migration and mechanical properties altering in Fe–10Ni–20Cr alloy under irradiation ..... 311
- Polikevich K.B., Petelin A.L., Plokhikh A.I., Fomina L.P. Nitrogen diffusion along the layer boundaries after nitriding of multilayer materials ..... 318
- Orlova D.V., Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Danilova L.V., Bochkareva A.V. Kinetics of deformation fronts during serrated Lüders deformation in  $\alpha$ -iron at high temperature ..... 325

SUPERDUTY STEEL

- Saulin D.V., Kuzminykh K.G., Poilov V.Z. Determination of hydrogen influence on microhardness and microstructure characteristics of aviation alloys ..... 332
- Fedorov A.S., Karasev V.S., Alekseeva E.L., Al'khimenko A.A., Shaposhnikov N.O. Problems of selection of corrosion-resistant steels and alloys in oil and gas industry for operating conditions ..... 340

СОДЕРЖАНИЕ (продолжение)

CONTENTS (Continuation)

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Бабенко А.А., Жучков В.И., Кель И.Н., Уполовникова А.Г., Шартдинов Р.Р. Термодинамическое моделирование межфазного распределения хрома и бора в шлаках восстановительного периода АКР-процесса ..... 351

Болгару К.А., Регер А.А., Верещагин В.И., Акулинкин А.А. Физико-химические процессы азотирования ферросиликохрома в режиме фильтрационного горения ..... 360

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ  
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ  
ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ  
И МАТЕРИАЛАХ

Фастыковский А.Р., Вахроломеев В.А., Никитин А.Г. Определение продольной устойчивости полосы в системе прокатная клеть – неприводное делительное устройство ..... 366

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
И АВТОМАТИЗАЦИЯ  
В ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Варгин А.В., Левицкий И.А. Математическое моделирование нагрева сляба в печи с шагающими балками с учетом их кривизны ..... 369

PHYSICO-CHEMICAL BASICS  
OF METALLURGICAL PROCESSES

Babenko A.A., Zhuchkov V.I., Kel' I.N., Upolovnikova A.G., Shartdinov R.R. Thermodynamic modeling of interphase distribution of chromium and boron in slags of AOD reduction period ..... 351

Bolgaru K.A., Reger A.A., Vereshchagin V.I., Akulinkin A.A. Physical and chemical processes during nitriding of chromium ferrosilicon by filtration combustion ..... 360

INNOVATIONS IN METALLURGICAL  
INDUSTRIAL AND LABORATORY  
EQUIPMENT, TECHNOLOGIES  
AND MATERIALS

Fastykovskii A.R., Vakhrolomeev V.A., Nikitin A.G. Determination of longitudinal stability of strip in rolling cage – non-drive dividing device system ..... 366

INFORMATION TECHNOLOGIES  
AND AUTOMATIC CONTROL  
IN FERROUS METALLURGY

Vargin A.V., Levitskii I.A. Mathematical modeling of slab heating in a furnace with walking beams due to their curvature ..... 369