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

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 65 Номер 8 2022

- ПО МАТЕРИАЛАМ КОНФЕРЕНЦИИ «МЕТАЛЛУРГИЯ – 2021»

Исследование процессов обезуглероживания периклазоуглеродистых и алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров

- МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Управление механическими свойствами высокоэнтропийного сплава Cantor CoCrFeMnNi

- ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Термодинамическое моделирование восстановления металлов в медеплавильных шлаках и экспериментальная проверка результатов

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

Исследование влияния параметров деформации на качество сортовых заготовок и мелющих шаров при их производстве из отбраковки рельсовых сталей

IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY Vol. 65 No. 8 2022

Web: fermet.misis.ru

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

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 65, Номер 8, 2022

Научно-технический журнал

Издается с января 1958 г. ежемесячно

IZVESTIYA
FERROUS METALLURGY

Volume 65, Number 8, 2022

Scientific and Technical Journal

Published since January 1958. Issued monthly

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

www.fermet.misis.ru

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

Варианты названия:

Известия вузов. Черная металлургия
Izvestiya. Ferrous Metallurgy

Учредители:

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., академик РАН, д.т.н., профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва
Ашихмин ГВ., 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., академик РАН, д.т.н., профессор, ВолгГТУ, г. Волгоград
Мешалкин В.П., академик РАН, д.т.н., профессор, РХТУ им. Д.И. Менделеева, г. Москва
Мулюков Р.Р., д.ф.м.-н., профессор, чл.-корр. ФГБУН ИПСМ РАН, г. Уфа
Мышляев Л.П., д.т.н., профессор, СибГИУ, г. Новокузнецк
Никулин С.А., д.т.н., профессор, чл.-корр. РАЕН, НИТУ «МИСиС», г. Москва
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
Пышминцев И.Ю., д.т.н., РосНИТИ, г. Челябинск
Рудской А.И., академик РАН, д.т.н., профессор, СПбПУ Петра Великого, г. Санкт-Петербург
Сивак Б.А., к.т.н., профессор, АО АХК «ВНИИМЕТМАШ», г. Москва
Симонян Л.М., д.т.н., профессор, НИТУ «МИСиС», г. Москва
Смирнов Л.А., академик РАН, д.т.н., профессор, ОАО «Уральский институт металлов», г. Екатеринбург
Солодов С.В., к.т.н., НИТУ «МИСиС», г. Москва
Спирин Н.А., д.т.н., профессор, УрФУ, г. Екатеринбург
Танг 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
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, Academician of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, Volgograd State Technical University, Volgograd
Valerii P. Meshalkin, Dr. Sci. (Eng.), Academician of RAS, Prof., D.I. Mendeleyev Russian Chemical-Technological University, Moscow
Radik R. Mulyukov, Dr. Sci. (Phys.-Chem.), Prof., Corresponding Member of RAS, Institute of Metals Superplasticity Problems of RAS, Ufa
Leonid P. 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
Igor' Yu. Pyshmintsev, Dr. Sci. (Eng.), Russian Research Institute of the Pipe Industry, Chelyabinsk
Andrei I. Rudskoi, Academician of RAS, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg
Oleg Yu. Sheshukov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Ural Federal University, Yekaterinburg
Laura M. Simonyan, Dr. Sci. (Eng.), Prof., NUST "MISIS", Moscow
Robert F. Singer, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Friedrich-Alexander University, Germany
Boris A. Sivak, Cand. Sci.(Eng.), Prof., VNIIMETMASH Holding Company, Moscow
Leonid A. Smirnov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academician of RAS, OJSC "Ural Institute of Metals", Yekaterinburg
Sergei V. Solodov, Cand. Sci. (Eng.), NUST "MISIS", Moscow
Speidel Marcus, Dr. Natur. Sci., Prof., Swiss Academy of Materials, Switzerland
Nikolai A. Spirin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Ural Federal University, Yekaterinburg
Tang Guoi, Institute of Advanced Materials of Tsinghua University, Shenzhen, China
Mikhail V. Temlyantsev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk
Ekaterina P. Volynkina, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk
Aleksei B. Yur'ev, Dr. Sci. (Eng.), Assist Prof., Siberian State Industrial University, Novokuznetsk
Vladimir S. Yusupov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of RAS, Moscow
Vladimir I. Zhuchkov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Institute of Metallurgy, Ural Branch of RAS, Ural Federal University, Yekaterinburg
Michael Zinigrad, Dr. Sci. (Physical Chemistry), Prof., Rector, Ariel University, Israel
Vladimir I. Zolotukhin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Tula State University, Tula

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

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

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

Articles are available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

СОДЕРЖАНИЕ / CONTENTS

ПО МАТЕРИАЛАМ КОНФЕРЕНЦИИ «МЕТАЛЛУРГИЯ – 2021»

Рыбенко И.А., Конголи Ф. Определение оптимальных режимов технологии получения марганцевых сплавов из бедных карбонатных и оксидных руд в агрегате СЭР 531

Иванов И.В., Эмурлаев К.И., Купер К.Э., Сафарова Д.Э., Батаев И.А. Структурные преобразования при отжиге холоднодеформированного высокоэнтропийного сплава $Al_{0,3}CoCrFeNi$ 539

Ренёв Д.С., Заякин О.В., Жучков В.И. Изучение времени плавления комплексных никельсодержащих ферросплавов в жидкой стали 548

Якушевич Н.Ф., Запольская Е.М., Темлянцев М.В., Протопопов Е.В., Темлянцева Е.Н., Приходько М.С. Исследование процессов обезуглероживания периклазоуглеродистых и алюмопериклазоуглеродистых ковшевых огнеупоров 555

BASED ON THE MATERIALS OF THE CONFERENCE "METALLURGY – 2021"

Rybenko I.A., Kongoli F. Determination of optimal technological modes for obtaining manganese alloys from poor carbonate and oxide ores in a jet-emulsion unit 531

Ivanov I.V., Emurlaev K.I., Kuper K.E., Safarova D.E., Bataev I.A. Structural transformations during annealing of cold-worked high-entropy alloy $Al_{0,3}CoCrFeNi$ .. 539

Renev D.S., Zayakin O.V., Zhuchkov V.I. Melting time of complex nickel-containing alloys in liquid steel 548

Yakushevich N.F., Zapol'skaya E.M., Temlyantsev M.V., Protopopov E.V., Temlyantseva E.N., Prikhod'ko M.S. Decarburization of periclase-carbon and aluminum-periclase-carbon ladle refractories 555

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Громов В.Е., Коновалов С.В., Шлярова Ю.А., Ефимов М.О., Панченко И.А. Управление механическими свойствами высокоэнтропийного сплава Cantor CoCrFeMnNi 563

Савченко Н.Л., Севостьянова И.Н., Тарасов С.Ю. Упругопластические свойства трибологических слоев композитов WC – (Fe – Mn – C), формирующихся после высокоскоростного скольжения по стали 573

MATERIAL SCIENCE

Gromov V.E., Konovalov S.V., Shlyarova Yu.A., Efimov M.O., Panchenko I.A. Control of mechanical properties of a high-entropy alloy Cantor CoCrFeMnNi .. 563

Savchenko N.L., Sevost'yanova I.N., Tarasov S.Yu. Elastoplastic properties of tribological layers of WC – (Fe – Mn – C) composites formed after high-speed sliding on steel 573

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Адилов Г., Поволоцкий А.Д., Рощин В.Е. Термодинамическое моделирование восстановления металлов в медеплавильных шлаках и экспериментальная проверка результатов 581

PHYSICO-CHEMICAL BASICS OF METALLURGICAL PROCESSES

Adilov G., Povolotskii A.D., Roshchin V.E. Thermodynamic modeling of metal reduction in copper-smelting slags and experimental verification of its results 581

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ И МАТЕРИАЛАХ

Фастыковский А.Р., Добрянский А.В., Дорофеев В.В. Силовые условия прокатки в универсальных калибрах современных рельсобалочных станов 590

Уманский А.А., Юрьев А.Б., Симачев А.С., Думова Л.В. Исследование влияния параметров деформации на качество сортовых заготовок и мелющих шаров при их производстве из отбраковки рельсовых сталей 596

INNOVATIONS IN METALLURGICAL INDUSTRIAL AND LABORATORY EQUIPMENT, TECHNOLOGIES AND MATERIALS

Fastykovskii A.R., Dobryanskii A.V., Dorofeev V.V. Power conditions of rolling in universal calibers of modern rail-beam mills 590

Umanskii A.A., Yur'ev A.B., Simachev A.S., Dumova L.V. Influence of deformation parameters on quality of billets and grinding balls during their production from rejects of rail steels 596

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

Оригинальная статья
УДК 621.771.01
DOI 10.17073/0368-0797-2022-8-590-595
https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2371

Силовые условия прокатки в универсальных калибрах современных рельсобалочных станов

А. Р. Фастыковский [1], А. В. Добрянский [2], В. В. Дорофеев [2]

[1] **Сибирский государственный индустриальный университет** (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)
[2] **АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»** (Россия, 654043, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, шоссе Космическое, 16)

Аннотация. Развитие подвижного железнодорожного состава, увеличение скорости перевозки, грузонапряженности магистралей и их протяженности требует постоянного совершенствования технологии производства железнодорожных рельсов. Современные рельсобалочные станы имеют в своем составе непрерывно-реверсивную группу клетей, в которую входят универсальные клети. Прокатка рельсовых профилей в универсальных калибрах кардинально отличается от прокатки в двухвалковых калибрах. В настоящее время она недостаточно хорошо изучена как в теоретическом, так и практическом плане. Определены условия осуществления процесса прокатки в универсальных калибрах с парой неприводных валков, учитывающие величины активных (резервных) сил трения, действующих со стороны приводных валков, и реактивных сил со стороны неприводных валков и валковой арматуры. Методом энергетического баланса решена задача по определению усилия подпора, необходимого для деформирования в неприводных валках. При решении уравнения равновесия сил в очаге деформации, образованном приводными валками, определен резерв сил трения, который во многом определяет возможность процесса прокатки. Получены теоретические зависимости для оценки силового баланса при прокатке в универсальных калибрах современных рельсобалочных станов с учетом резерва сил трения, обеспеченного приводными валками, и подпора, необходимого для деформирования в неприводных валках. Информация о силовых условиях в универсальном калибре необходима для анализа процесса прокатки в универсальном калибре при различных режимах деформирования и уточнения коэффициентов вытяжки по элементам получаемого профиля. Предложены зависимости позволяющие оценить расход резерва сил трения на работу валковой арматуры, которая обслуживает универсальный калибр. Уточнена известная формула А.И. Целикова, А.И. Гришкова по определению уширения применительно к прокатке в универсальных калибрах с двумя неприводными валками. Отмечено влияние подпора со стороны неприводных валков на изменение размеров подошвы и головки рельсовых профилей.

Ключевые слова: силовые условия, универсальный калибр, рельсобалочный стан, область осуществимости, уширение, коэффициент вытяжки

Для цитирования: Фастыковский А.Р., Добрянский А.В., Дорофеев В.В. Силовые условия прокатки в универсальных калибрах современных рельсобалочных станов // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 8. С. 590–595.
https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-8-590-595

Original article

Power conditions of rolling in universal calibers of modern rail-beam mills

A. R. Fastykovskii [1], A. V. Dobryanskii [2], V. V. Dorofeev [2]

[1] **Siberian State Industrial University** (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)
[2] **JSC "EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant"** (16 Kosmicheskoe Route, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654043, Russian Federation)

Abstract. Development of rolling stock, increase in the speed of transportation, load-bearing capacity of highways and their length requires constant improvement of the production technology for railway rails. Modern rail-beam mills have in their composition a continuously reversible group of stands, which includes universal stands. Rolling of rail profiles in universal calibers is radically different from rolling in two-roll calibers, and at the moment is not well studied, both theoretically and practically. The article defines the conditions for feasibility of the rolling process in universal calibers with a pair of non-drive rolls, taking into account the values of active (reserve friction forces) acting from the drive rolls and reactive forces from the non-drive rolls and roller fittings. The energy balance method solves the problem of determining the back-up force required for deformation in non-drive rolls. When solving the equation of equilibrium of forces in the deformation center formed by the drive rolls, the reserve of friction forces is defined, the magnitude

© А. Р. Фастыковский, А. В. Добрянский, В. В. Дорофеев, 2022

of which largely determines the possibility of the rolling process. Theoretical dependences are obtained for estimating the power balance during rolling in universal calibers of modern rail-beam mills, taking into account the reserve of friction forces provided by the drive rolls and the support required for deformation in non-drive rolls. Information about the force conditions in a universal caliber is necessary to analyze the feasibility of the rolling process in it under various deformation modes and to clarify the drawing coefficients for elements of the resulting profile. Dependencies are proposed that allow estimating the consumption of the reserve of friction forces for the operation of roller fittings serviced by universal caliber. The well-known formula of A.I. Tselikov and A. I. Grishkov on the definition of broadening was clarified in relation to rolling in universal calibers with two non-drive rolls. The support from the non-drive rolls side effects the change in size of sole and head of the rail profiles.

Keywords: power conditions, universal caliber, rail-beam mill, feasibility area, broadening, extraction coefficient

For citation: Fastykovskii A.R., Dobryanskii A.V., Dorofeev V.V. Power conditions of rolling in universal calibers of modern rail-beam mills. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 8, pp. 590–595. (In Russ.). https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-8-590-595

Введение

Технологический процесс прокатки постоянно совершенствуется, внедряется новое оборудование и приемы обработки, совершенствуются методики расчетов и анализа новых технических и технологических решений [1, 2]. Такая тенденция не обошла стороной и рельсобалочное производство. Современный рельсобалочный стан в своем составе имеет непрерывно-реверсивную группу клетей (тандем-группа), в которую входят универсальные клети. Способ прокатки рельсов в универсальных клетях получил широкое распространение за рубежом, начиная со второй половины прошлого века, и является основным направлением совершенствования технологии производства рельсов в настоящее время [3 – 10]. Использование универсальных клетей позволяет добиться высокой производительности, хороших потребительских свойств рельсовой продукции [11 – 13]. Использование универсальных калибров существенно меняет баланс сил в очаге деформации по сравнению с прокаткой в двухвалковых калибрах, что, в свою очередь, перераспределяет коэффициенты вытяжки по элементам рельсовых профилей и требует соответствующих корректировок калибровок. В настоящее время вопрос силового баланса в универсальных калибрах рельсобалочных станов является недостаточно изученным и требует дополнительных исследований.

Постановка задачи

Особенность прокатки в универсальных калибрах заключается в том, что из четырех валков два горизонтальные (приводные), а два вертикальные (неприводные). Деформирование неприводными валками осуществляется за счет использования резерва втягивающих сил трения приводных валков. При расчетах формоизменения металла в универсальных калибрах необходимо учитывать этот фактор, так как при небольших резервах втягивающих сил трения возможны пробуксовки и другие негативные явления.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим прокатку в универсальных калибрах при условии, что два горизонтальных валка – приводные, а два вертикальных – неприводные. Прокатка для рассматриваемого случая возможна при следующем условии:

$$Q_{п} - Q_{н} - Q_{а} > 0, \quad (1)$$

где $Q_{п}$ – горизонтальная составляющая втягивающих сил трения приводных горизонтальных валков; $Q_{н}$ и $Q_{а}$ – горизонтальная составляющая силы, необходимой для деформирования металла неприводными валками и для работы валковой арматуры.

Устойчивая прокатка в универсальном калибре возможна при 30 % запасе втягивающих сил трения и с учетом этого зависимость (1) преобразуется к виду:

$$\frac{Q_{п}}{Q_{н} + Q_{а}} > 1{,}3. \quad (2)$$

Для проверки выполнения условия (2) необходимо определить горизонтальные проекции соответствующих сил.

Горизонтальную составляющую силы, необходимой для деформирования металла вертикальными неприводными валками, определим при решении уравнения энергетического баланса:

$$N_{ф} + N_{тр} + N_{х} - N_{н} = 0, \quad (3)$$

где $N_{ф}$, $N_{тр}$, $N_{х}$ и $N_{н}$ – мощность, необходимая для формоизменения, преодоления сил трения, холостого хода и деформирования неприводными валками.

При прокатке рельсовых профилей левый и правый вертикальные валки имеют различные контуры поверхности и разную деформацию головки и подошвы. Для учета рассматриваемой особенности при определении продольной силы, необходимой для деформирования, сначала рассмотрим симметричную прокатку с размерами и режимами деформации, соответствующими левому валку, затем проведем аналогичные расчеты для правого валка, просуммируем полученные значения продольных сил и поделим пополам.

При решении уравнения (3) необходимо воспользоваться зависимостями для определения соответствующих мощностей.

Мощность для деформирования $N_{н}$ неприводными валками можно найти по формуле [14]:

$$N_н = \sigma_н V_с, \quad (4)$$

где $\sigma_н$ – напряжение подпора для деформирования неприводными валками, МПа; $V_с$ – секундный объем.

Мощность на формоизменение определим по следующему уравнению:

$$N_ф = p_{ср} v \omega_{ср} \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right), \quad (5)$$

где v – скорость прокатки, м/с; $\omega_{ср}$ – средняя площадь сечения, мм^2; h_0 и h_1 – начальная и конечная толщина полосы, мм; $p_{ср}$ – среднее нормальное напряжение, МПа.

Мощность сил трения на контактной поверхности неприводных валков определим с учетом мощностей сил трения, действующих в зонах опережения и отставания, с использованием зависимостей [15], по формуле:

$$N_{тр} = \int\int_{F_{от}} \tau_{от} \Delta v_{от} dF + \int\int_{F_{оп}} \tau_{оп} \Delta v_{оп} dF, \quad (6)$$

где $\Delta v_{от}$ и $\Delta v_{оп}$ – продольные составляющие скоростей скольжения в зонах отставания и опережения, мм/с; $\tau_{от}$ и $\tau_{оп}$ – касательные силы трения в зонах отставания и опережения, МПа; $F_{от}$ и $F_{оп}$ – контактные площади в зонах отставания и опережения, мм^2.

Мощность, расходуемая на вращение неприводных валков [15], определим по выражению:

$$N_х = -\int\int_{F_{от}} \tau_{от} v_в dF + \int\int_{F_{оп}} \tau_{оп} v_в dF, \quad (7)$$

где $v_в$ – горизонтальная составляющая окружной скорости валков, м/с.

Решая совместно уравнения (6) и (7), получена зависимость вида:

$$N_{тр} + N_х = \sum_1^n \left(\int\int_{F_{оп}} \tau_{оп} v_м dF - \int\int_{F_{от}} \tau_{от} v_м dF \right), \quad (8)$$

где $v_м$ – скорость частиц металла на контактной поверхности в направлении, касательном к поверхности валков, мм/с.

После соответствующих подстановок и решения уравнения (3) получим зависимость для определения горизонтальной составляющей силы, необходимой для деформирования неприводными вертикальными валками:

$$Q_н = p_{ср} S_0 \ln\lambda_н + b_{ср} \mu_н p_{ср} l_{dн} \times \times \left[\frac{\lambda_н^{0,75}}{\cos(0,25\alpha_н)} - \frac{\lambda_н^{0,25}}{\cos(0,75\alpha_н)} \right], \quad (9)$$

где S_0 – площадь поперечного сечения на входе в универсальный калибр, мм^2; $\lambda_н$ – коэффициент вытяжки металла при деформировании неприводными валками; $\mu_н$ – коэффициент трения в неприводных валках; $\alpha_н$ – угол захвата неприводными валками, рад; $l_{dн}$ – длина дуги захвата в неприводных валках; $b_{ср}$ – средняя ширина полосы в неприводных валках, мм.

Для определения резерва сил трения в приводных валках воспользуемся решением уравнения равновесия сил в очаге деформации. Рассмотрим предельные условия, когда подпирающая сила уравновешивает резерв сил трения. В этом случае в очаге деформации остается одна зона отставания.

Спроектируем силы, действующие в симметричном очаге деформации, по направлению движения металла (ось x):

$$2R_п b'_{ср} \int_0^\alpha \tau_{ср} \cos\theta d\theta - 2R_п b'_{ср} \int_0^\alpha p_{ср} \sin\theta d\theta - Q_п = 0, \quad (10)$$

где $R_п$ – радиус приводных валков, мм; $\tau_{ср}$ – среднее касательное напряжение при деформировании в приводных валках, МПа; θ – текущий угол, рад; α – угол захвата в приводных валках, рад; $b'_{ср}$ – средняя ширина полосы в приводных валках, мм.

Преобразуя полученное уравнение, допустим, что касательные напряжения связаны с нормальными через коэффициент трения:

$$2R_п b'_{ср} \mu_у p_{ср} \int_0^\alpha \cos\theta d\theta - 2R_п b'_{ср} p_{ср} \int_0^\alpha \sin\theta d\theta - Q_п = 0, \quad (11)$$

где $Q_п$ – резерв втягивающих сил трения приводных горизонтальных валков, Н; $\mu_у$ – коэффициент трения в приводных валках на установившейся стадии прокатки.

После решения уравнения (11) получим зависимость для определения резерва втягивающих сил трения приводных горизонтальных валков:

$$Q_п = p_{ср} l_d b'_{ср} (2\mu_у - \alpha), \quad (12)$$

где l_d – длина дуги захвата в приводных горизонтальных валках, мм.

Еще одним источником реактивной силы является валковая арматура, работа которой обеспечивается резервом сил трения очага деформации обслуживаемой клети. При прокатке железнодорожных рельсов в тандем-группе использование валковой арматуры сводится к минимуму с целью снижения поверхностных дефектов и этой составляющей можно пренебречь. При прокатке асимметричных рельсовых профилей, таких как остряковые, усековые рельсы или при использовании универсальных калибров на сортовых станах валковая арматура задействуется в полном объеме. Это вносит изменение в энергетический баланс и этот факт нужно учитывать. Основные функции валковой арматуры, обслуживающей универсальный калибр, сводятся к удержанию профиля от сваливания и правке полосы на выходе.

Определим необходимое продольное усилие для удержания от сваливания в вводной арматуре. Мощность, расходуемую на удержание от сваливания, можно найти по формуле [16]:

$$N_c = M_c \omega = M_c \theta_c v, \quad (13)$$

где M_c – момент скручивания, Н·м; ω – угловая скорость скручивания, с$^{-1}$; v – скорость движения раската, м/с; θ_c – относительный угол закручивания на единицу длины, рад.

Подставив соответствующую зависимость для определения входящих в формулу (13) величин [17, 18], после преобразований получим:

$$Q_c = \frac{0{,}157\sigma_s h_{пр}^2 \left(3b_{пр} - h_{пр}\right)}{L_c}, \quad (14)$$

где L_c – расстояние от оси удерживающего ролика до оси валков, мм; $b_{пр}$ и $h_{пр}$ – ширина и высота приведенной полосы, мм; σ_s – сопротивление деформации, МПа.

Продольную силу, необходимую для пластического изгиба выходящего из очага деформации конца полосы, можно определить по формуле:

$$Q_{изг} = \frac{b_{пр} h_{пр}^2 \sigma_s \mu}{2x\left(1 - \frac{x}{l_{пров}}\right)}, \quad (15)$$

где $l_{пров}$ – длина проводки, мм; x – расстояние от носка проводки до места приложения силы, мм; μ – коэффициент трения между полосой и проводкой.

Продольную силу, необходимую для работы валковой арматуры, можно найти по формуле:

$$Q_a = Q_c + Q_{изг}. \quad (16)$$

Использование универсальных калибров при производстве рельсов по сравнению с классическим способом кардинально меняет баланс сил в очаге деформации. Появляются дополнительные реактивные (подпирающие) силы, действующие со стороны неприводных валков. Реактивные силы со стороны неприводных валков, действующие на подошву и головку, меняют условия уширения рассматриваемых элементов (приращение фланцев) в сторону увеличения, что, в свою очередь, снижает коэффициенты вытяжки подошвы и головки в универсальном калибре [19].

Дополнительное приращение фланцев за счет уширения необходимо учесть и компенсировать увеличением деформации во вспомогательной клети дуо.

В литературе известна формула А.И. Целикова, А.И. Гришкова для определения уширения (Δb) с учетом внешнего силового воздействия в виде натяжения или подпора [20]:

$$\Delta b = 0{,}54 C_B C_\sigma \left(l_d - \frac{\Delta h}{2\mu_y}\right) \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right), \quad (17)$$

где C_B – коэффициент, учитывающий влияние ширины; C_σ – коэффициент, учитывающий влияние натяжения или подпора.

С учетом полученных зависимостей (9) и (16), коэффициент C_σ можно определить по формуле:

$$C_\sigma = 1 + \frac{2(Q_н + Q_a)}{F_1 \sigma_s}, \quad (18)$$

где F_1 – площадь поперечного сечения на выходе из очага деформации.

Используя полученные зависимости, можно определить приращение ширины элементов рельсового профиля и коэффициенты вытяжки. Полученная информация необходима для корректировки профиля в универсальных клетях непрерывной тандем-группы современного рельсобалочного стана.

Выводы

Определены условия осуществимости процесса прокатки в универсальных калибрах с парой неприводных валков. Получены зависимости, позволяющие оценить силовой баланс в универсальных калибрах современных рельсобалочных станов, учитывающие подпирающие силы со стороны вертикальных неприводных валков и валковой арматуры. Уточнена известная формула А.И. Целикова, А.И. Гришкова для определения уширения элементов рельсовых профилей за счет учета силового баланса универсальных калибров.

Список литературы / References

1. Fastikovskiy A.R., Dorofeev V.V., Efimov O.Yu. Evaluation of technological risks in the work of rolling equipment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 411. Article 012080. http://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012080
2. Fastykovskiy A.R., Peretyatko V.N., Evstifeev V.V., Efimov O.Yu. Performance analysis of the rolling equipment using computer modeling // IOP Conference Series: Materials Science and Engi-

1. Fastikovskiy A.R., Dorofeev V.V., Efimov O.Yu. Evaluation of technological risks in the work of rolling equipment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 411, article 012080. http://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012080
2. Fastykovskiy A.R., Peretyatko V.N., Evstifeev V.V., Efimov O.Yu. Performance analysis of the rolling equipment using computer modeling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineer-*

neering. 2018. Vol. 411. Article 012081.
http://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012081

3. Lassent A. Le train a'poutrelles et a'rails de l'usine d'hagauge (SASILOR) // Revue de Metallurge. 1974. Vol. 11. No. 10. P. 733–748. (In Fr.).
4. Mennel G. Schienenwalzung in Universal Gerust der Modernisienung der Strass Hagange // Der Kalibreur. 1981. No. 35. P. 15, 16. (In Germ.).
5. Svejkovsky U. Newest technologies for economical sections production // AISE Steel Technology. 2002. Vol. 79. No. 2. P. 33–39.
6. Frank E. Fonner. Steel dynamics commissions its new structural and rail division // AISE Steel Technology. 2002. Vol. 79. No. 11-12. P. 27–35.
7. Nigris G., Schroder J. Profile sizing process for high-quality medium / heavy sections and rails // MPT International. 2002. Vol. 25. No. 3. P. 48–54.
8. Шилов В.А., Шварц Д.Л., Скосарь Е.О. Особенности прокатки длинномерных рельсов на универсальном рельсобалочном стане // Металлург. 2016. № 3. С. 44-48.
9. Svejkovsky U., Perala R.E. State of the art of rail rolling // Iron and Steel Technology. 2005. Vol. 2. No. 10. P. 19–24.
10. Universal rail and section rolling mill for Wisco // NEWSletter SMS Metallurgy. 2006. No. 2. P. 78.
11. Головатенко А.В., Волков К.В., Дорофеев В.В., Степанов С.В., Добрянский А.В. Развитие технологии прокатки и процессов калибровки железнодорожных рельсов // Производство проката. 2014. № 2. С. 25–39.
12. Смирнов В.К., Бондин А.Р., Михайленко А.М. Исследование прокатки рельсов в универсальных клетях // Производство проката. 2003. № 12. С. 24–30.
13. Фастыковский А.Р., Перетятько В.Н. Неприводные универсальные калибры – новое направление в производстве рельсов // Металлург. 2002. № 5. С. 48–50.
14. Фастыковский А.Р., Перетятько В.Н. Изучение резервных сил трения при прокатке в вытяжных калибрах // Известия вузов. Черная металлургия. 2002. Т. 45. № 4. С. 22–24.
15. Выдрин В.Н., Федосиенко А.С., Крайнов В.И. Процесс непрерывной прокатки. М.: Металлургия, 1970. 456 с.
16. Федин В.П., Грицук Н.Ф. Валковая арматура сортовых станов. М.: Металлургия, 1975. 216 с.
17. Работнов Ю.М. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. 742 с.
18. Александров А.В., Потапов В.Д., Державин Б.П. Сопротивление материалов. М.: Высш. шк., 2003. 560 с.
19. Суворов И.К. Уширение при прокатке в неприводных валках // Известия вузов. Черная металлургия. 1961. Т. 4. № 1. С. 118–120.
20. Никитин Г.С. Теория непрерывной продольной прокатки. М.: изд. МГТУ им. Баумана, 2009. 399 с.

ing. 2018, vol. 411, article 012081.
http://doi.org/10.1088/1757-899X/411/1/012081

3. Lassent A. Le train a'poutrelles et a'rails de l'usine d'hagauge (SASILOR). *Revue de Metallurge*. 1974, vol. 11, no. 10, pp. 733–748. (In Fr.).
4. Mennel G. Schienenwalzung in Universal Gerust der Modernisienung der Strass Hagange. *Der Kalibreur*. 1981, no. 35, pp. 15, 16. (In Germ.).
5. Svejkovsky U. Newest technologies for economical sections production. *AISE Steel Technology*. 2002, vol. 79, no. 2, pp. 33–39.
6. Frank E. Fonner. Steel dynamics commissions its new structural and rail division. *AISE Steel Technology*. 2002, vol. 79, no. 11-12, pp. 27–35.
7. Nigris G., Schroder J. Profile sizing process for high-quality medium / heavy sections and rails. *MPT International*. 2002, vol. 25, no. 3, pp. 48–54.
8. Shilov V.A., Shvarts D.L., Skosar' E.O. Aspects of the rolling of long rails on a universal rail-beam mill. *Metallurgist*. 2016, vol. 60, no. 3-4, pp. 260–266. https://doi.org/10.1007/s11015-016-0284-9
9. Svejkovsky U., Perala R.E. State of the art of rail rolling. *Iron and Steel Technology*. 2005, vol. 2, no. 10, pp. 19–24.
10. Universal rail and section rolling mill for Wisco. *NEWSletter SMS Metallurgy*. 2006, no. 2, pp. 78.
11. Golovatenko A.V., Volkov K.V., Dorofeev V.V., Stepanov S.V., Dobryanskii A.V. Development of rolling technology and calibration processes of railway rails. *Proizvodstvo prokata*. 2014, no. 2, pp. 25–39. (In Russ.).
12. Smirnov V.K., Bondin A.R., Mikhailenko A.M. Investigation of rolling rails in universal stands. *Proizvodstvo prokata*. 2003, no. 12, pp. 24–30. (In Russ.).
13. Fastykovskii A.R., Peretyat'ko V.N. Use of non-driven universal passes is new trend in rail production. *Metallurg*. 2002, no. 5, pp. 48–50. (In Russ.).
14. Fastykovskii A.R., Peretyat'ko V.N. Studying the reserve forces of friction during rolling in break-down passes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2002, vol. 45, no. 4, pp. 22–24. (In Russ.).
15. Vydrin V.N., Fedosienko A.S., Krainov V.I. *Process of Continuous Rolling*. Moscow: Metallurgiya, 1970, 456 p. (In Russ.).
16. Fedin V.P., Gritsuk N.F. *Roll Reinforcement of Long Mills*. Moscow: Metallurgiya, 1975, 216 p. (In Russ.).
17. Rabotnov Yu.M. *Mechanics of a Deformable Solid*. Moscow: Nauka, 1988, 742 p. (In Russ.).
18. Aleksandrov A.V., Potapov V.D., Derzhavin B.P. *Resistance of Materials*. Moscow: Vyssh. shk., 2003, 560 p. (In Russ.).
19. Suvorov I.K. Broadening when rolling in non-drive rolls. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1961, vol. 4, no. 1, pp. 118–120. (In Russ.).
20. Nikitin G.S. *Theory of Continuous Longitudinal Rolling*. Moscow: Izd. MSTU im. Baumana, 2009, 399 p. (In Russ.).

Сведения об авторах

Андрей Ростиславович Фастыковский, *д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК»,* Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: omd@sibsiu.ru

Андрей Владимирович Добрянский, *старший калибровщик рельсобалочного цеха,* АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
E-mail: Andrey.Dobryanskij@evraz.com

Владимир Викторович Дорофеев, *д.т.н., главный калибровщик рельсобалочного цеха,* АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат»
E-mail: Vladimir.Dorofeev@evraz.com

Information about the authors

Andrei R. Fastykovskii, *Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof, Head the Chair "Metal Forming and Metal Science. OJSC "EVRAZ ZSMK",* Siberian State Industrial University
E-mail: omd@sibsiu.ru

Andrei V. Dobryanskii, *Senior Calibrator of Rail-Beam Shop,* JSC "EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant"
E-mail: Andrey.Dobryanskij@evraz.com

Vladimir V. Dorofeev, *Dr. Sci. (Eng.), Chief Calibrator of Rail-Beam Shop,* JSC "EVRAZ – Joint West Siberian Metallurgical Plant"
E-mail: Vladimir.Dorofeev@evraz.com

Вклад авторов

А. Р. Фастыковский – постановка и решение задачи по определению продольной силы, необходимой для деформирования в неприводных валках, установление зависимости для определения резерва сил трения в приводных валках.
А. В. Добрянский – аналитический обзор по теме статьи, определение условий осуществимости процесса деформирования в универсальном калибре, установление зависимости для определения продольной силы, необходимой для работы валковой арматуры, обслуживающей универсальный калибр.
В. В. Дорофеев – постановка и решение задачи по учету влияния реактивных сил трения, действующих со стороны неприводных валков, на уширение в универсальном калибре.

Contribution of the authors

A. R. Fastykovskii – formulation and solution of the problem of determining the longitudinal force necessary for deformation in non-drive rolls, establishing a dependence for determining the reserve of friction forces in drive rolls.
A. V. Dobryanskii – analytical review on the topic of the article, determination of the conditions of the deformation process in a universal caliber, establishment of the dependence for determining the longitudinal force necessary for the operation of the roll reinforcement serving the universal caliber.
V. V. Dorofeev – formulation and solution of the problem of accounting for the effect of reactive friction forces acting from the non-drive rolls on broadening in a universal caliber.

Поступила в редакцию 17.12.2021
После доработки 01.06.2022
Принята к публикации 09.06.2022

Received 17.12.2021
Revised 01.06.2022
Accepted 09.06.2022

Над номером работали:

Леонтьев Л.И., *главный редактор*

Протопопов Е.В., *заместитель главного редактора*

Ивани Е.А., *заместитель главного редактора*

Бащенко Л.П., *заместитель ответственного секретаря*

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

Запольская Е.М., *ведущий редактор*

Киселева Н.Н., *ведущий редактор*

Расенець В.В., *верстка, иллюстрации*

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

Подписано в печать 25.08.2022. Формат 60×90 $^{1}/_{8}$. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 9,75. Заказ 15529. 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

Determination of optimal technological modes for obtaining manganese alloys from poor carbonate and oxide ores in a jet-emulsion unit

Structural transformations during annealing of cold-worked high-entropy alloy $Al_{0.3}CoCrFeNi$

Melting time of complex nickel-containing alloys in liquid steel

Decarburization of periclase-carbon and aluminum-periclase-carbon ladle refractories

Control of mechanical properties of a high-entropy alloy Cantor CoCrFeMnNi

Elastoplastic properties of tribological layers of WC – (Fe – Mn – C) composites formed after high-speed sliding on steel

Thermodynamic modeling of metal reduction in copper-smelting slags and experimental verification of its results

Energy efficiency of a cone crusher with stops

Influence of deformation parameters on quality of billets and grinding balls during their production from rejects of rail steels