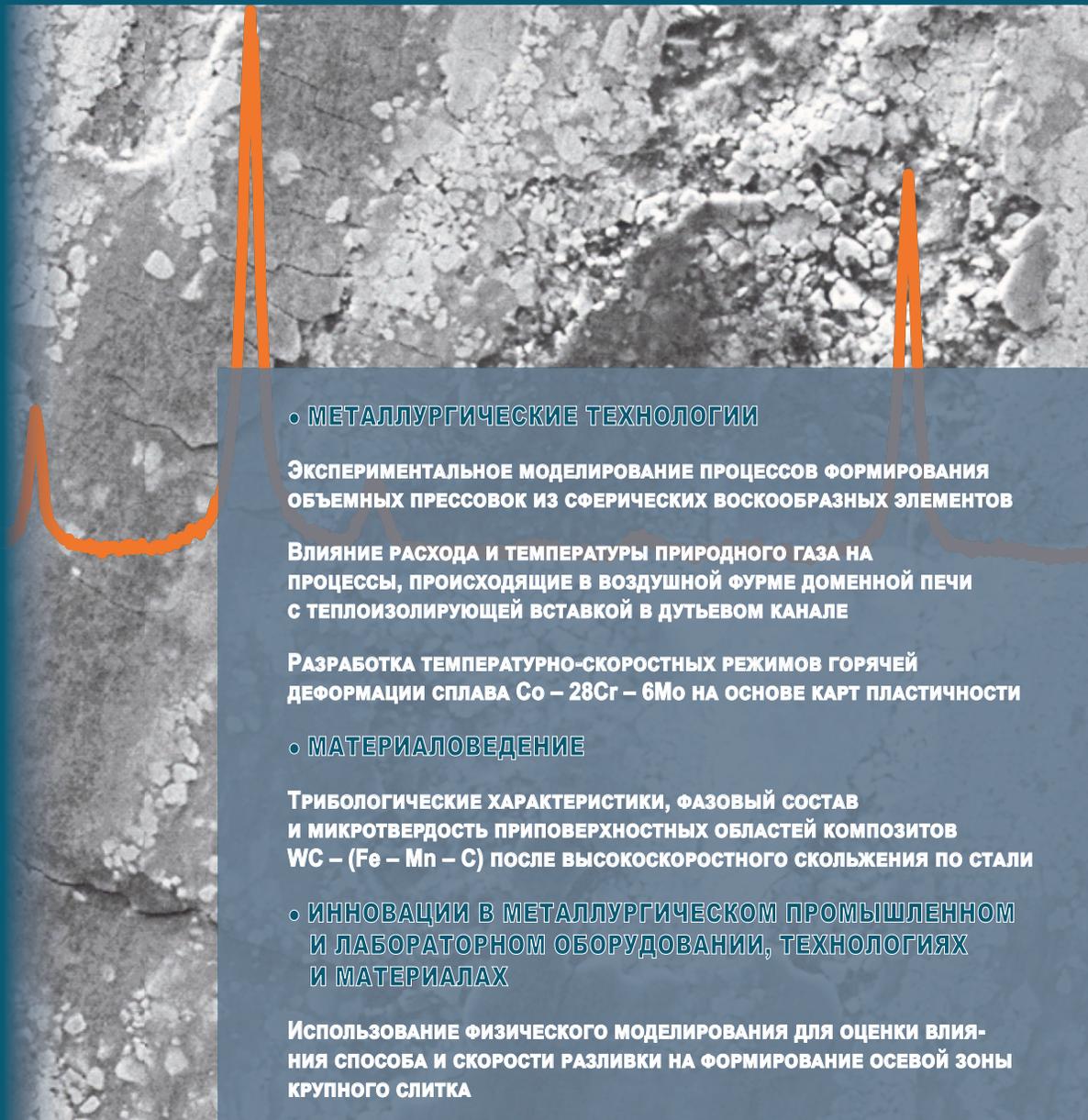


ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 65 Номер 11 2022



◦ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ
ОБЪЕМНЫХ ПРЕССОВОК ИЗ СФЕРИЧЕСКИХ ВОСКООБРАЗНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**ВЛИЯНИЕ РАСХОДА И ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА
ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ВОЗДУШНОЙ ФУРМЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ
С ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩЕЙ ВСТАВКОЙ В ДУТЬЕВОМ КАНАЛЕ**

**РАЗРАБОТКА ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ ГОРЯЧЕЙ
ДЕФОРМАЦИИ СПЛАВА Co – 28Cr – 6Mo НА ОСНОВЕ КАРТ ПЛАСТИЧНОСТИ**

◦ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

**ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ
И МИКРОТВЕРДОСТЬ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЛАСТЕЙ КОМПОЗИТОВ
WC – (Fe – Mn – C) ПОСЛЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ ПО СТАЛИ**

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

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯ-
НИЯ СПОСОБА И СКОРОСТИ РАЗЛИВКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ОСЕВОЙ ЗОНЫ
КРУПНОГО СЛИТКА**



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

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Том 65, Номер 11, 2022

Научно-технический журнал
Издается с января 1958 г. ежемесячно

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

Volume 65, Number 11, 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:



Редакционная коллегия:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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@sisis.ru

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Индексирование: Scopus, Russian Science Citation Index (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
Izvestiya. Ferrous Metallurgy

Founders:



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@sisis.ru

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

Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Vladimir V. Kurnosov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assist. Prof., NUST "MISIS", Moscow

Linn Horst, Linn High Therm GmbH, Hirschbach, Germany

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Indexed: Scopus, Russian Science Citation Index (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

- Жилин С.Г., Богданова Н.А., Комаров О.Н.** Экспериментальное моделирование процессов формирования объемных прессовок из сферических воскообразных элементов 758
- Михайленко А.М., Шварц Д.Л.** Концепция оптимальной калибровки сортопрокатных валков. Сообщение 4. Оптимизация схемы калибровки 769
- Албул С.В., Кобелев О.А., Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Левицкий И.А.** Влияние расхода и температуры природного газа на процессы, происходящие в воздушной фурме доменной печи с теплоизолирующей вставкой в дутьевом канале 778
- Гамин Ю.В., Коротицкий А.В., Кин Т.Ю., Галкин С.П., Костин С.А., Тихомиров Е.О.** Разработка температурно-скоростных режимов горячей деформации сплава Co – 28Cr – 6Mo на основе карт пластичности 786

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Савченко Н.Л., Севостьянова И.Н., Тарасов С.Ю.** Трибологические характеристики, фазовый состав и микротвердость приповерхностных областей композитов WC – (Fe – Mn – C) после высокоскоростного скольжения по стали 798

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Лебедев А.Б., Шуйская В.С.** Влияние состава и скорости охлаждения алюмокальциевого шлака на его рассыпаемость 806

ИННОВАЦИИ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ
ПРОМЫШЛЕННОМ И ЛАБОРАТОРНОМ
ОБОРУДОВАНИИ, ТЕХНОЛОГИЯХ
И МАТЕРИАЛАХ

- Гаманюк С.Б., Руцкий Д.В., Зюбан Н.А., Кириличев М.В., Никитин М.С., Гурулев Д.Н.** Использование физического моделирования для оценки влияния способа и скорости разлива на формирование осевой зоны крупного слитка 814

METALLURGICAL TECHNOLOGIES

- Zhilin S.G., Bogdanova N.A., Komarov O.N.** Experimental simulation of volumetric compacts formation from spherical waxy elements 758
- Mikhailenko A.M., Shvarts D.L.** The concept of optimal bar roll pass design. Report 4. Optimization of roll pass design scheme 769
- Albul S.V., Kobelev O.A., Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Levitskii I.A.** Effect of natural gas flow rate and temperature on the processes occurring in a blast furnace tuyere with heat-insulating insert in blast channel 778
- Gamin Yu.V., Korotitskii A.V., Kin T.Yu., Galkin S.P., Kostin S.A., Tikhomirov E.O.** Development of temperature-speed modes of hot deformation of Co–28Cr–6Mo alloy based on processing maps 786

MATERIAL SCIENCE

- Savchenko N.L., Sevost'anova I.N., Tarasov S.Yu.** Tribological characteristics, phase composition and microhardness of subsurface regions of WC – (Fe – Mn – C) composites after high-speed sliding on steel 798

PHYSICO-CHEMICAL BASICS
OF METALLURGICAL PROCESSES

- Lebedev A.B., Shuiskaya V.S.** Influence of composition and cooling rate of alumocalcium slag on its crumblability 806

INNOVATIONS IN METALLURGICAL
INDUSTRIAL AND LABORATORY
EQUIPMENT, TECHNOLOGIES
AND MATERIALS

- Gamanyuk S.B., Rutskii D.V., Zyuban N.A., Kirilichev M.V., Nikitin M.S., Gurulev D.N.** Application of physical simulation to evaluate the impact of teeming method and rate on axial zone formation of large ingots 814

Нефедов А.В., Шкурко Т.Г., Чиченев Н.А., Холодова Н.В. Модернизация вагона-хоппера для перевозки агломерата и других материалов 824

ИСТОРИЯ ОТРАСЛИ

Запарий В.В., Запарий Вас.В., Шешуков О.Ю. Советская металлургия глазами американских металлургов: вторая половина 1950-х гг. Металлургическое образование – сравнительный анализ 831

К 100-летию со дня рождения Разикова Михаила Ивановича 837

Nefedov A.V., Shkurko T.G., Chichenev N.A., Kholodova N.V. Modernization of hopper car for transportation of agglomerate and other materials 824

HISTORY OF METALLURGY

Zaparii V.V., Zaparii Vas.V., Sheshukov O.Yu. Soviet metallurgy in the eyes of American metallurgists: the second half of the 1950s. Metallurgical education – comparative analysis 831

To the 100th Anniversary of Razikov Mikhail Ivanovich .. 837

**Оригинальная статья**

УДК 621.74.045:53.09

DOI 10.17073/0368-0797-2022-11-758-768

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2429>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЪЕМНЫХ ПРЕССОВОК ИЗ СФЕРИЧЕСКИХ ВОСКООБРАЗНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

С. Г. Жилин, Н. А. Богданова, О. Н. Комаров

Институт машиноведения и металлургии Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН (Россия, 681005, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, 1)

Аннотация. Рост металлоемкости промышленного производства и объемов потребления готовой металлопродукции определяет актуальность разработки и исследования энергоэффективных технологических процессов, направленных на сокращение издержек за счет снижения числа операций при сохранении эксплуатационных характеристик продукта. В машиностроении задачи получения заготовок повышенной размерно-геометрической точности и сложной конфигурации решаются при помощи распространенного метода литья по выплавляемым моделям. Увеличению применения такого технологического подхода к получению заготовок в машиностроении препятствует ряд физических явлений, связанных с термическим расширением модельных и керамических материалов, что приводит к росту конечной стоимости продукта. Устранение значительного числа дефектообразующих факторов возможно за счет применения инновационного решения, заключающегося в формировании пористых удаляемых моделей прессованием композиций на основе воскообразных материалов. Таким способом решается проблема усадки материала и повышается трещиностойкость керамических форм, что позволяет в значительной мере сократить долю механической обработки заготовок в общем объеме технологических операций. Технические испытания нового метода позволили установить причину, по которой в настоящее время не удается полностью избавиться от операций механической обработки литых заготовок. Проблема преимущественно состоит в упругом отклике уплотняемого материала модельной композиции, что в ряде случаев сказывается на увеличении размеров прессовок. В работе рассмотрено исследование влияния начальной упаковки элементов сферической формы, имитирующих одно- и двухкомпонентные модельные композиции, на напряженно-деформированное состояние порошкового тела, подвергающегося одностороннему уплотнению в жесткой цилиндрической матрице до технологически обоснованных значений плотности. Результаты эксперимента представлены в виде зависимостей напряжения от деформации. Рассмотрены предпочтительные условия формирования прессовок с минимальными значениями упругого отклика уплотненного материала.

Ключевые слова: металлоемкое производство, специальные методы литья, технологические процессы, экспериментальное моделирование, формирование прессовок, воскообразные материалы, напряженно-деформированное состояние

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН.

Для цитирования: Жилин С.Г., Богданова Н.А., Комаров О.Н. Экспериментальное моделирование процессов формирования объемных прессовок из сферических воскообразных элементов // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 11. С. 758–768.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-758-768>

Original article

EXPERIMENTAL SIMULATION OF VOLUMETRIC COMPACTS FORMATION FROM SPHERICAL WAXY ELEMENTS

S. G. Zhilin, N. A. Bogdanova, O. N. Komarov

Institute of Metallurgy and Mechanical Engineering of the Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (1 Metallurgov Str., Komsomolsk-on-Amur, Khabarovsk Territory 681005, Russian Federation)

Abstract. The growth in metal intensity of industrial production and the volume of consumption of finished metal products determine the relevance of development and research of energy efficient technological processes aimed at reducing costs by reducing the number of operations while maintaining product performance. In mechanical engineering, the problem of obtaining blanks with increased dimensional and geometric accuracy and complex configuration is solved by using a common method of investment casting. Expansion of the use of such technological approach to produce blanks in mechanical engineering is hindered by a number of physical phenomena associated with the thermal expansion of investment and ceramic materials, which leads to an increase in the product final cost. A significant number of defect-forming factors can be eliminated by applying an innovative

solution consisting in the formation of porous removable models by compacting mixtures based on waxy materials. This solves the problem of material shrinkage and increases the crack resistance of ceramic molds, which significantly reduces the share of machining in the overall volume of technological operations. Technical tests of the new method have revealed the reason why the machining of castings cannot be completely eliminated at present. The problem mainly lies in elastic response of compacted material of the model mixture, which, in some cases, affects the increase in the compacts size. This paper considers the effect of initial packing of spherical-shaped elements simulating one- and two-component model mixtures on the stress-strain state of a powder body subjected to unilateral compaction in a rigid cylindrical matrix to technologically justified density values. The results of the experiment are presented in the form of stress-strain relations. Preferable conditions of compact formation with minimal values of elastic response of the compacted material are considered.

Keywords: metal-intensive production, special casting methods, technological processes, experimental modeling, molding, waxy materials, stress-strain state

Funding: The work was performed within the framework of the state task of Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Zhilin S.G., Bogdanova N.A., Komarov O.N. Experimental simulation of volumetric compacts formation from spherical waxy elements. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 11, pp. 758–768. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-758-768>

ВВЕДЕНИЕ

Мировые тенденции роста объемов металлоемких производств, таких как авто-, авиа- и судостроение, определяют спрос на литейную заготовительную продукцию [1]. В современных условиях функционирования как российских, так и зарубежных предприятий машиностроительного комплекса определяющим фактором их устойчивого развития является разработка и применение энерго- и материалоэффективных технологий, обеспечивающих получение продукта с требуемым набором характеристик при низких уровнях затрат, связанных с внедрением таких технологий [2, 3]. Актуальность поиска вариантов решения этой проблемы представляется наиболее высокой для предприятий, реализующих многооперационный технологический цикл производства изделий, специализирующихся, например, на выпуске литой металлопродукции [4]. Высокий спрос на качественное литье подтверждается значительной долей его использования при получении сложных агрегатов и конструктивных узлов (более 70 % деталей современных двигателей внутреннего сгорания получены литьем). Задача сокращения числа операций при сохранении требуемых параметров качества изделий для предприятий, располагающих производством литых заготовок повышенной точности, в том числе со сложной конфигурацией, представляется наиболее острой [5]. Так, подразделения предприятий, специализирующихся на выпуске литья по выплавляемым моделям, помимо значительной номенклатуры используемых при получении отливок материалов неизбежно сталкиваются с проблемой значительного количества стадий технологического цикла. Несмотря на то, что технология литья по выплавляемым моделям (ЛВМ) ориентирована на получение литья, соответствующего 11–16 квалитетам при допусках на размеры рабочей полости пресс-формы не выше 8–9 квалитетов [6], каждый из этапов производства характеризуется определенными видами дефектов, которые в конце технологической цепи приводят к значительной

доле суммарного неисправимого брака и, как следствие, снижению конкурентоспособности продукции ввиду роста ее стоимости.

Традиционная последовательность операций получения отливок в литье по выплавляемым моделям состоит из следующих основных стадий [7]:

1 – формирование выплавляемых моделей заливкой (либо запрессовкой) жидкой (либо в виде пасты) воскообразной массы в пресс-форму, включающее исправление усадочных дефектов и сборку моделей на модельных блоках припаиванием;

2 – формирование на собранных модельных блоках керамической оболочки в ходе последовательного нанесения и сушки огнеупорных слоев (в среднем от трех до пяти) путем поочередного погружения модельного блока в суспензию и огнеупорную фракцию с сушкой каждого слоя;

3 – выплавление модельной массы из керамической оболочковой формы путем ее погружения в ванну с разогретым жидким теплоносителем (как правило, водой с температурой, превышающей температуру плавления модельного воскообразного состава);

4 – прокаливание керамических оболочковых форм при температуре около 900 °С для удаления из их структур остатков модельной массы и снижения температурного градиента при заливке расплавом;

5 – удаление керамики и элементов литниковопитательной системы с поверхности отливок, очистка и механическая обработка последних.

В результате анализа производственных данных и серии экспериментальных исследований установлено, что значительной проблемой большинства представленных операций являются теплофизические явления, связанные с получением и использованием выплавляемых воскообразных моделей (наиболее распространенных в практике применения данного способа) [8]. Так, на первом этапе усадочные процессы, сопровождающие остывание модельной массы в пресс-форме, приводят к уменьшению объемов изделия в среднем на 6–12 %, а в некоторых случаях и до 14 % и, как следствие, необходимости исправления данного вида

дефекта [9]. Кроме того, бездефектное формирование выплавляемой модели должно осуществляться в узком температурном интервале с целью исключения поверхностных пороков в виде складок и волнистости. Вторая стадия чревата нарушениями геометрии поверхности формирующегося внутреннего слоя керамики ввиду невысокой смачиваемости воскообразной модельной массы [10]. На третьем этапе, ввиду теплового расширения нагреваемой модельной массы, возможно нарушение целостности керамической формы и, как следствие, разрушение последней, либо присутствие в структуре конечного литья неметаллических включений [11]. Удаление заключенных в поры керамической формы остатков модельной массы также опасно ее термическим расширением и нарушением целостности керамики. В совокупности отмеченные недостатки приводят к необходимости применения припусков на механическую обработку существенно больших, чем это необходимо для получения требуемых размеров детали.

Современные технологические приемы снижения влияния представленных выше неблагоприятных факторов на конечные характеристики литья преимущественно сводятся к поиску вариантов оптимизации процессов, связанных с проектированием [12, 13], контролем [14] и некоторыми изменениями механических характеристик продуктов промежуточных стадий. Так, повышение точности выплавляемых моделей достигается в результате изменения составов модельных масс, что позволяет снизить коэффициент термического расширения [15]. Уменьшение величины усадки модели в ряде случаев достигается за счет снижения температуры запрессовки модельной массы. Трещиностойкость керамической оболочковой формы достигается, например, за счет армирования ее структуры различными материалами и вставками [16]. Отмеченные методы в совокупности положительно влияют на качественные характеристики литья, но проблема устранения большей части причин брака остается нерешенной, что определяет актуальность поиска комплексного варианта устранения дефектообразующих факторов.

В Хабаровском Федеральном исследовательском центре Дальневосточного отделения Российской академии наук с начала 2000-х годов осуществляется разработка технологических приемов и протекающих при этом физических процессов, позволяющих повысить размерную и геометрическую точность литых изделий [8]. В основе рассматриваемых в настоящей работе процессов положены принципы формирования выплавляемых моделей прессованием порошковых модельных композиций на воскообразной основе без внешних источников тепла. В процессе формирования прессовки за счет перемещения пресс-пуансона увеличивается нагрузка на порошковое тело, что приводит к механической диссипации, определяющей оплавление частиц порошка в зонах их контакта и появление жидкой фазы

воскообразного материала, обеспечивающей копирование формообразующей поверхности пресс-формы. Уплотнение порошкового тела происходит также в результате трения о стенки пресс-формы и деформации частиц. Реализация таких принципов формирования выплавляемых моделей с пористостью 6 – 12 % преследует ряд целей:

- отсутствие литейных дефектов (усадка, волнистость, нарушение геометрии взаимно-перпендикулярных поверхностей и т. д.);

- сокращение технологического цикла и снижение экологического производственного фактора за счет исключения операции расплавления модельной массы;

- обеспечение термостабильности прессовок благодаря равномерности распределения напряжений в их структуре за счет пористости;

- устранение дефектов керамических форм, связанных с тепловым расширением материала выплавляемых моделей как на стадии их выплавления, так и на стадии прокаливания керамики перед заливкой [8]. Пористость целесообразно считать по формуле

$$\Pi = \left(1 - \frac{\rho_{\text{пор}}}{\rho_{\text{лит}}} \right) 100 \%,$$

где $\rho_{\text{пор}}$ – плотность пористого прессованного материала, г/см³; $\rho_{\text{лит}}$ – плотность литого материала, г/см³.

Экспериментально установлено, что качество поверхности и геометрия таких прессовок соответствуют чистоте обработки пресс-формы, а точность прессовок на 1 – 2 квалитета выше, чем у выплавляемых моделей, полученных заливкой жидкого модельного материала в пресс-форму.

Несмотря на очевидные преимущества метода, его широкому распространению препятствует недостаточная изученность процесса упругой релаксации уплотненного воскообразного материала после снятия нагрузки при формировании прессовок сложной конфигурации. Так, экспериментально установлено, что величина упругого отклика цилиндрической прессовки (с отношением высоты к диаметру основания 1:1) из воскообразного материала на основе парафина в направлении, поперечном ходу прессования, достигает 0,4 – 0,6 % от размеров формообразующей полости пресс-формы, и 0,5 – 1,2 % в направлении оси прессования. Видно, что значения величины упругого отклика уплотненного модельного материала более, чем на порядок ниже значений усадки. Механическая прочность пористой структуры, полученной прессованием, несколько ниже, чем у традиционных выплавляемых моделей, но компенсируется более высокой теплоустойчивостью [8]. Повысить прочность и пористость прессовок, снизить величину упругого отклика уплотненного материала отчасти удастся включением в порошок модельного состава растворимых компонентов. Удаление таких комбинированных моделей из керами-

ческой оболочки выполняется в два этапа: помещение оболочки с модельным блоком в воду для удаления растворимых компонентов (и образованием изолированных пор в структуре модели) с последующим погружением в нагретый теплоноситель для выплавления остатков модельной воскообразной массы. Как правило, такие материалы в модельной композиции играют роль упругих элементов и не деформируются в ходе уплотнения порошкового тела [17].

Проблема прогноза значений упругой разгрузки материала при релаксации напряжений во многом определяется рядом факторов, среди которых, например, параметры уплотняемого порошкового материала (насыпная плотность, фракция и начальная упаковка), конфигурация прессовки и ее протяженность, наличие участков с существенными различиями площадей сечений, удаленность элемента прессовки от места поступления порошкового материала в пресс-форму и т. д. Предварительными экспериментами установлено, что при уплотнении равnofракционных компонентов увеличивается вероятность формирования прессовки с однородными характеристиками по ее высоте [10]. Отмеченные факторы в совокупности определяют картину напряженно-деформированного состояния прессовки и повышают вероятность неравномерного распределения плотности в объеме изделия и возможности некоторого изменения его геометрии после снятия нагрузки.

Прогнозирование конечных свойств прессовок сложной геометрии из порошковых материалов на воскообразной основе при помощи известных математических моделей и расчетных методов представляется затруднительным ввиду уникальности таких материалов. Поскольку, согласно результатам предварительных экспериментов [18], они характеризуются сочетанием значений модуля упругости Юнга $E \sim 80$ МПа и коэффициента Пуассона $\mu \sim 0,5$, эти материалы не являются конструкционными, а их структура схожа со структурой ряда полимеров [19, 20]. Поэтому использование результатов известных расчетных методов [21 – 24] для целей описания напряженно-деформированного состояния прессовок и проектирования пресс-форм видится весьма сложным и определяет необходимость осуществления натурального эксперимента. В этой связи устранение упругого отклика уплотненного материала, равно как и разработка методов прогнозирования его величины в различных участках прессовок, определяет актуальность исследований, предпринимаемых в данном направлении.

Таким образом, целью исследования является экспериментальное моделирование напряженно-деформированного состояния объемных прессовок, получаемых из порошковых модельных композиций на основе воскообразных материалов.

В рамках поставленной цели в работе решались следующие задачи:

– исследование влияния состава модельной порошковой композиции на основе воскообразного материала и кубической упаковки его компонентов на напряженно-деформированное состояние объемной прессовки в процессе одностороннего уплотнения в закрытой пресс-матрице;

– определение возможности управления размерно-геометрическими параметрами конечной прессовки из модельной порошковой композиции, получаемой в процессе одностороннего уплотнения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для экспериментального моделирования в качестве основы порошковых модельных композиций выбраны воскообразные материалы марок Т1 (парафин очищенный) и ПС50/50 (сплав парафина и стеарина в соотношении 1:1). Использование этих материалов обусловлено практической целесообразностью, поскольку они являются наиболее распространенными для реализации процессов ЛВМ и соответствуют первой классификационной группе [5]. Реальные характеристики используемых в исследовании материалов могут быть отличными от регламентированных ГОСТами, поэтому определены экспериментально [18]: для Т1 плотность $\rho = 0,86$ г/см³, модуль Юнга $E = 81,91$ МПа; для ПС 50/50 $\rho = 0,935$ г/см³ и $E = 71,8$ МПа соответственно.

Фракция воскообразного материала зависит от метода его получения и представляет собой частицы в виде хлопьев или гранул. При описании процессов прессования порошковых сред ряд ученых, исследующих процессы порошковой металлургии, принимают модель механизма деформирования тела, состоящего из сферических элементов, взаимодействующих между собой за счет сил трения [25]. В настоящем эксперименте для визуализации процесса формирования объемных прессовок из материалов Т1 и ПС50/50 изготовлены и использованы сферические элементы диаметром 10 мм. Сферические элементы получены заливкой расплавов воскообразных материалов в пресс-форму. Значение плотности каждого отдельного воскообразного элемента соответствовало плотности материала в литом состоянии.

При моделировании процесса уплотнения модельных композиций с растворимыми компонентами последние принимаются упругими (недеформируемыми). Для их имитации использованы шарики диаметром 10 мм, выполненные из стали 45, свойства которой регламентированы ГОСТ 1050-2013 «Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия». В качестве характеристик этого материала отметим, что его модуль Юнга составляет $E = 210$ ГПа, а плотность $\rho = 7810$ кг/м³. Пресс-форма также выполнена из стали 45. Принимаемое в

Начальные условия формирования прессовок

Initial conditions for the compacts formation

Вариант размещения элементов согласно рис. 1	Кубическая упаковка воскообразных элементов		Кубическая упаковка модельной композиции с содержанием упругих элементов, %					
			20		30		50	
Материал элементов	T1	ПС 50/50	T1	ПС 50/50	T1	ПС 50/50	T1	ПС 50/50
Объем уплотняемого тела, см ³	225,0	225,0	201,6	201,6	190,2	190,2	166,8	166,8
Начальная плотность композиции из воскообразных элементов*, кг/м ³	477,8	515,6	428,6	464,3	386,8	431,9	322,3	349,2
Число воскообразных элементов в пресс-матрице	225	225	180	180	158	158	112	112
Доля объема, занимаемого воскообразными элементами в пресс-форме, %	52,0	52,0	41,6	41,6	36,5	36,5	25,8	25,8

* В случае, когда экспериментальная модельная композиция состоит из смеси воскообразных и стальных сферических элементов, объем последних не учитывается, так как они в ходе уплотнения не деформируются.

эксперименте допущение, согласно которому в ходе исследования деформация материала пресс-формы и стальных сферических элементов отсутствует, не снижает достоверность результатов.

На рис. 1 представлена принципиальная схема осуществления процесса формирования тела пористой выплавляемой модели в форме куба со стороной, равной 50 мм. Последовательность экспериментальной формовки следующая: на основание 1 пресс-формы устанавливается ее формообразующая часть 2, внутрь которой помещаются сферические элементы модельной композиции дозой в количестве, указанном в таблице. Здесь также указана начальная плотность композиции для всех вариантов упаковки воскообразных элементов. В процессе уплотнения порошковое тело проходит три основные стадии [26]:

- структурная деформация, связанная с перераспределением и уплотнением частиц и характеризующаяся ростом нагрузки при перемещении пуансона;

- рост давления прессования без увеличения плотности прессовки;

- пластическая деформация, охватывающая весь объем каждой частицы уплотняемого порошкового тела при отсутствии смещения межчастичных контактов.

Практический интерес представляет характеристика процесса уплотнения, описываемая зависимостью деформации материала от нагрузки. С целью исключения первой стадии уплотнения порошкового тела в эксперименте сферические элементы размещали в пресс-форме в кубическом порядке, как показано на рис. 1. Такой вариант начальной упаковки частиц материала обеспечивает имитацию условий, характерных для второй стадии уплотнения, при которой каждый элемент порошкового тела в момент нагружения «контактирует» по шести точкам. Для моделирования процесса деформирования композиций на основе воскообразных материалов, содержащих 20, 30 и 50 % растворимых

компонентов, сферические воскообразные и стальные упругие элементы также укладывали в кубическом порядке (рис. 1, б). Темным цветом на рис. 1, б выделены упругие недеформируемые элементы, выполненные из стали 45. В отличие от известных методов моделирования процессов деформирования пористых тел из однородных материалов и получения прессовки с характерной анизотропией свойств [27, 28] или моделей процессов уплотнения порошковых материалов с отно-

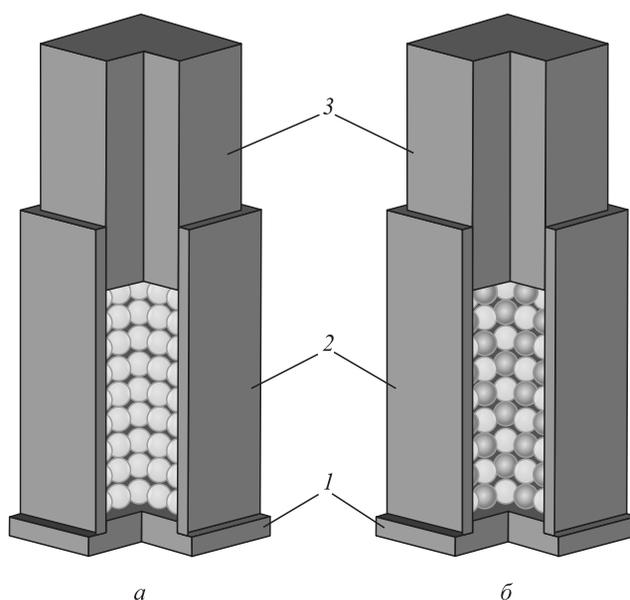


Рис. 1. Схема размещения элементов воскообразной модельной композиции в пресс-форме при формировании прессовки: а – кубическая упаковка воскообразных сферических элементов; б – кубическая упаковка композиции, состоящей из воскообразных и стальных сферических элементов в соотношении 50/50

Fig. 1. Diagram of elements of the waxy model mixture in the mold during the compact formation: а – cubic packing of the spherical elements; б – cubic packing of the mixture consisting of wax and steel spherical elements in ratio of 50/50

сительно более пластичными единичными включениями [29], в представляемом авторами эксперименте роль будущей поры в прессовке играет более упругое тело. Таким образом, при прессовании растворимый элемент представляет собой упругое недеформируемое включение, которое после формирования прессовки подвергается растворению, образуя пору.

По завершении компактования сферических элементов в пресс-форму последняя устанавливалась на рабочий стол универсальной тестовой машины AGX plus Shimadzu. Серией предварительных исследований установлено, что в ходе уплотнения воскообразных порошковых тел по достижении значения деформации 10 % и более на характер изменения значений напряжений существенное влияние оказывает скорость перемещения пресс-пуансона. Таким образом, чем выше скорость перемещения пресс-пуансона при уплотнении шаровидных воскообразных элементов модельного материала, тем значения напряжений будут больше. В этой связи в настоящем эксперименте выбрана наиболее приемлемая скорость перемещения подвижной траверсы тестовой машины AGX plus Shimadzu, равная 0,5 мм/с, что обеспечивает относительно равномерный процесс уплотнения порошкового тела. Скорость перемещения пресс-пуансона менее 0,5 мм/с представляется технологически нецелесообразной, а ее превышение повысит вероятность появления визуально определяемого «фронта» уплотнения и, как следствие, получение прессовки с неравномерным упругим откликом по ее периферии. Характеристики точности хода и нагружения устройства AGX plus Shimadzu обеспечивают достаточную достоверность экспериментальных результатов при фактическом отклонении не более 0,03 % в интервале значений нагрузки от 0 до 100 кН и деформации от 0 до 10 мм. Температура воздуха в помещении составляла 21 °С.

На основании данных, полученных с тестовой машины AGX plus Shimadzu, строились экспериментальные кривые уплотнения воскообразных порошковых сред.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Уплотнение моделируемого порошкового тела осуществляли до момента достижения материалом деформируемых воскообразных элементов технологически целесообразного уровня пористости 6 %, отмеченного выше. В результате уплотнения получали прессовку в виде куба со стороной 5 см. Таким образом, плотность конечной прессовки из материала Т1 составляла 0,808 г/см³, а материала ПС 50/50 – 0,879 г/см³ соответственно.

Из результатов серии предварительных исследований известно, что использованные в настоящем эксперименте воскообразные материалы характеризуются относительно высоким пределом текучести в сравне-

нии с пределом прочности на сжатие [18, 30, 31]. Это обстоятельство определяет характер процесса прессования, отличающийся от идеального случая уплотнения порошков в закрытой пресс-матрице тем, что график «напряжение – деформация» не имеет трех четких последовательных стадий (структурная деформация уплотняемой системы, рост давления прессования без увеличения плотности прессовки и фаза пластической деформации, распределяющейся на весь объем прессовки), а происходит взаимное наложение стадий процесса прессования или их одновременное течение.

В связи с отмеченным выше, целесообразной представляется визуализация экспериментальных результатов в виде полиномиальных зависимостей третьего порядка, отражающих взаимосвязь роста напряжения на пресс-пуансоне и значения относительной деформации уплотняемого порошкового тела (рис. 2, 3). Представленная на рис. 2 кривая экспериментальной зависимости 1 характеризует процесс уплотнения сферических элементов из воскообразной композиции на основе материала Т1 до достижения прессовкой значения пористости 6 %. Аналогично предыдущей, кривая 2, соответственно, характерна для процесса уплотнения сферических элементов из воскообразной композиции на основе материала марки ПС 50/50. Символы $R_{(1-2)}^2$ – величины достоверности аппроксимации полиномиальных зависимостей для сферических элементов из материалов Т1 и ПС 50/50 и условий их начальной кубической упаковки.

Анализ представленных на рис. 2 зависимостей показывает, что для формирования объемной пресс-

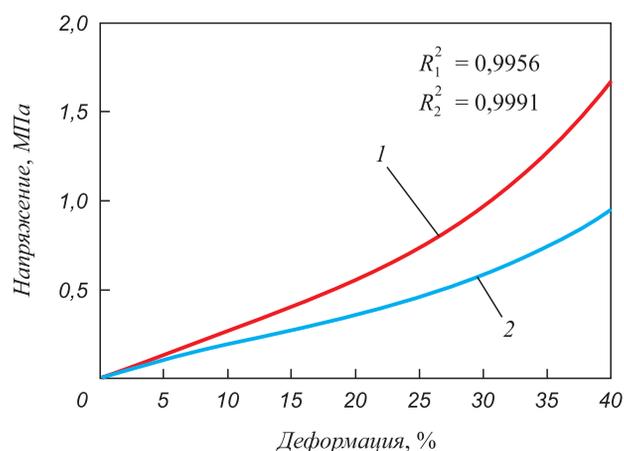


Рис. 2. Полиномиальные зависимости напряжения от деформации, полученные в ходе уплотнения элементов модельного материала, имеющих кубический порядок начальной упаковки в пресс-форме:

1 – для прессовок из материала Т1; 2 – для прессовок из материала ПС 50/50

Fig. 2. Polynomial dependences of stress on deformation, obtained during compaction of elements of model material with cubic order of initial packing in the mold:

1 – for the compact of T1 material; 2 – for the compact of PS 50/50 material

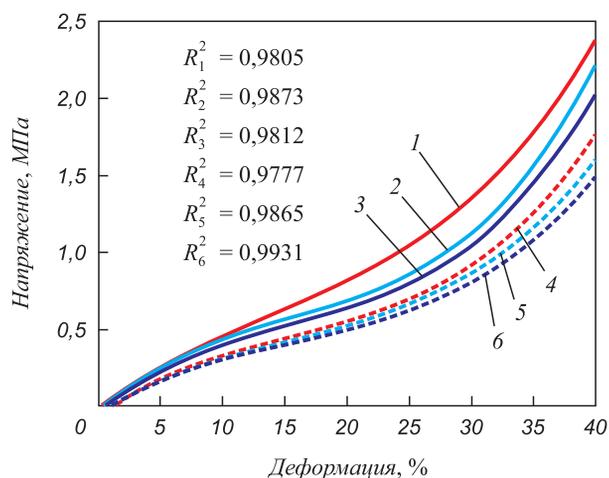


Рис. 3. Полиномиальные зависимости напряжения от деформации, полученные в ходе уплотнении смеси из упругих стальных и воскообразных элементов из модельного материала, имеющих кубический порядок начальной упаковки в пресс-форме: 1, 2, 3 – для прессовок из материала Т1 с содержанием упругих элементов 50, 30 и 20 % соответственно; 4, 5, 6 – для прессовок из материала ПС 50/50 с содержанием упругих элементов 50, 30 и 20 % соответственно

Fig. 3. Polynomial dependences of stress on deformation, obtained during compaction of the mixture of elastic steel and waxy elements from the model material with cubic order of initial packing in the mold:

1, 2, 3 – for the compacts of T1 material containing 50, 30 and 20 % of elastic elements, correspondingly; 4, 5, 6 – for the compacts of ПС 50/50 material containing 50, 30 and 20 % of elastic elements, correspondingly

совки пористостью 6 % из Т1 достаточным является напряжение 1,7 МПа, в то время как для прессовки из ПС 50/50 требуется еще меньшее напряжение, не превышающее 1 МПа. Такое различие в нагрузках, требуемых для формирования прессовок из материалов Т1 и ПС 50/50, объясняется, по видимому, различием физических свойств материалов, а именно их плотности и температуры плавления. Очевидно, что процесс прессования порошкового тела с большей насыпной плотностью будет характеризоваться и большими значениями напряжений. В процессе уплотнения в результате роста нагрузки на уплотняемое порошковое тело и, как следствие, механической диссипации, происходит оплавление элементов порошкового тела в зонах их контакта (и появление локальных участков жидкой фазы). Экспериментально, при помощи дифференциально-термического анализатора Shimadzu DTG-60Н, в ходе нагрева материалов со скоростью 2 °С/мин определено, что температура плавления Т1 составляет 60 °С, а материала марки ПС 50/50 – 52 °С соответственно [9]. Отмеченные выше различия в физических параметрах материалов, использованных в эксперименте, объясняют более высокие пластические свойства материала ПС 50/50 и, как следствие, меньшие значения нагрузки, необходимые для формирования прессовки требуемой плотности.

Соответственно для достижения прессовкой из гетерогенных материалов на основе Т1 или ПС 50/50 значений пористости, превышающих 6 %, значения нагрузок будут ниже, и могут быть определены из графиков, представленных на рис. 2. Это обстоятельство обуславливает невысокие требования к прочности пресс-формы, что определяет перспективы для реализации процесса в производственных условиях.

При формировании прессовок с водорастворимыми компонентами значения напряжений, возникающих в ходе уплотнения гетерогенных порошковых материалов, будут значительно выше. На рис. 3 представлены полиномиальные зависимости напряжения от деформации, полученные в ходе уплотнения смеси из упругих стальных и воскообразных элементов из модельного материала, имеющих, как и в случае с однородными материалами, кубический порядок начальной упаковки в пресс-форме.

Из анализа рис. 2, 3 видно, что напряжения, возникающие при прессовании воскообразной части модельной композиции до значений деформации 40 %, существенно превосходят по значению напряжения, требующиеся для уплотнения однородных воскообразных материалов при тех же значениях деформации. Так, например, для формирования прессовки из однородной композиции ПС 50/50 до уровня деформации 36,5 %, что соответствует значению пористости 10 %, характерно значение напряжения 0,8 МПа. Для процесса прессовки композиции на основе ПС 50/50, содержащей 20 % упругих элементов, значения напряжений для такого уровня деформаций составляют уже 1,25 МПа. Таким образом, сопоставление данных, представленных на рис. 2 и 3, позволяет оценить различие напряжений, характерных для любой стадии деформирования уплотняемого тела, состоящего из однородных и гетерогенных материалов. Очевидно, что для случая с однородными материалами фронт уплотнения продвигается равномерно по всей площади прессовки в направлении оси прессования. При формировании прессовки из композиции, содержащей упругие недеформируемые элементы, последние рассеивают фронт уплотнения, что приводит к росту напряжений при формировании прессовки и, как следствие, определяют рост значений упругого последействия уплотненного материала после снятия нагрузки.

В результате ряда исследований, предшествующих настоящей работе, установлена предпочтительность выдержки уплотненного материала под нагрузкой после завершения его пластической деформации. Такой подход позволяет снизить величину упругого последействия материала экспериментальных прессовок как за счет снижения температуры прессовки, так и за счет релаксации напряжений в результате локального перераспределения плотности и релаксации материала. О снижении напряжений судили по результатам выдержки материала под нагрузкой, осуществляемого при помо-

щи тестовой машины AGX plus Shimadzu. В результате эксперимента установлено, что значения напряжений в воскообразном материале, пребывающем под нагрузкой, когда формообразующие поверхности пресс-матрицы находятся в сомкнутом состоянии, снижаются более, чем на 90 % уже к восьмой минуте выдержки для материала Т1 и к четвертой минуте для материала ПС 50/50.

Фиксация конечных размеров прессовки осуществлялась в двух плоскостях по центру поперечного сечения и по вертикали при помощи цифрового регистратора DIN 863 Vogel, обеспечивающего точность измерения 0,001 мм. Отклонение значений размеров прессовки в местах измерений от внутренних размеров соответствующих частей пресс-формы в положительную или отрицательную сторону позволяет регистрировать упругий отклик или усадку материала. Величину таких отклонений можно определить по формуле

$$O = \left(\frac{A_{\text{внут}} - A_{\text{внеш}}}{A_{\text{внеш}}} \right) 100 \%,$$

где O – величина отклонения, %; $A_{\text{внут}}$ и $A_{\text{внеш}}$ – контролируемые размеры внутренней полости пресс-формы и внешнего размера прессовки соответственно, мм.

В результате эксперимента установлено, что для релаксации напряжений (в интервале 0,95 ÷ 1,65 МПа), характерных для процесса уплотнения сферических элементов воскообразных материалов марок Т1 и ПС 50/50 до пористости 6 %, время выдержки прессовки под нагрузкой составляет 8 – 12 мин. Это позволяет обеспечить величину O (отклонения значений размеров прессовки от внутренних размеров соответствующих частей пресс-формы) в интервале значений 0,05 – 0,01 %. В результате эксперимента установлено, что для релаксации напряжений (в интервале 1,45 ÷ 2,35 МПа), характерных для процесса уплотнения композиций, состоящих из сферических элементов воскообразных материалов марок Т1, ПС 50/50 и упругих недеформируемых сферических элементов (в количестве от 20 до 50 %) до значений пористости 6 %, время выдержки прессовки под нагрузкой не превышает 7 мин. Это позволяет обеспечить величину O в интервале значений, сопоставимых со значениями, характерными для прессовок из однородных материалов. Установлено, что увеличение содержания недеформируемых элементов в модельных композициях, имитирующих водорастворимые компоненты, позволяет ускорить релаксацию прессовки. Безусловно, физические свойства реальных растворимых компонентов отличаются от имитирующих их

стальных элементов и эффект снижения времени релаксации будет не таким значительным. Однако повышение конструкционной прочности такой прессовки и ее геометрических параметров позволяют расширить область применения экспериментального метода в промышленных условиях.

Выводы

При формировании пористой удаляемой модели в условиях отсутствия внешних источников тепла прессованием композиций, состоящих из воскообразных компонентов, значения остаточных напряжений возможно регулировать начальной упаковкой материала в пресс-матрице, скоростью деформирования элементов, входящих в состав композиций, и временем выдержки прессовки под нагрузкой.

Установлено, что формирование объемной прессовки из порошкового тела, содержащего однородный воскообразный материал, характеризующийся большей насыпной плотностью, обуславливает более высокие значения напряжений и, как следствие, более высокие значения упругого последействия. При формировании прессовок с водорастворимыми компонентами значения напряжений, возникающих в ходе уплотнения гетерогенных порошковых материалов, будут значительно выше. Для случая с однородными материалами фронт уплотнения продвигается равномерно по всей площади прессовки в направлении оси прессования. При формировании прессовки из композиции, содержащей упругие недеформируемые элементы, последние рассеивают фронт уплотнения, что приводит к росту напряжений при формировании прессовки и, как следствие, определяют рост значений упругого последействия уплотненного материала после снятия нагрузки. Несмотря на более высокие значения напряжений, возникающих при уплотнении гетерогенных порошковых тел, их релаксация наступает раньше, чем у прессовок, полученных из порошков однородных материалов, что, по-видимому, объясняется изменением роста скорости охлаждения материала после деформации.

Относительно невысокие значения напряжений при формировании прессовок из однородных и гетерогенных материалов обуславливают невысокие требования к прочности пресс-формы, что, в свою очередь, определяет перспективы для реализации процесса в производственных условиях.

Отличительной чертой разрабатываемых технологических приемов является низкий уровень материальных и энергетических затрат, снижение экологических факторов, связанных с возможной их реализацией в промышленных условиях [32].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- Zhou L., Xu J.F., Xu X.B. Construction of scientific evaluation system for energy saving and emission reduction oriented to product full life-cycle // *Applied Mechanics and Materials*. 2013. Vol. 291–294. P. 693–695.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.291-294.693>
- Kim S.K. Effect of product quality on life cycle assessment in aluminum die casting process // *Materials Science Forum*. 2007. Vol. 544–545. P. 259–262.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.544-545.259>
- Sata A., Ravi B. Bayesian inference-based investment-casting defect analysis system for industrial application // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 90. No. 9–12. P. 3301–3315. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9614-0>
- Rodriguez A., López de Lacalle L.N., Calleja A., Lamikiz A.F. Maximal reduction of steps for iron casting one-of-a-kind parts // *Journal of Cleaner Production*. 2012. Vol. 24. P. 48–55.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.054>
- Литье по выплавляемым моделям / Под. общ. ред. В.А. Озерова. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1994. 448 с.
- Zhilin S.G., Komarov O.N., Bogdanova N.A. Production of the steel casting with improved dimensional and geometrical accuracy using complex models // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. Vol. 709. No. 3. Article 033104.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/3/033104>
- Vidyarthi G., Gupta N. New development in investment casting process // *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2017. Vol. 8. No. 12. P. 529–540.
- Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н. Управление структурой и свойствами пористых комбинированных удаляемых моделей. Владивосток: Дальнаука, 2007. 137 с.
- Жилин С.Г., Богданова Н.А., Комаров О.Н. Влияние гранулометрического состава и скорости выдавливания воскообразной композиции на геометрию длинномерной прессовки при мундштучном экструдировании // *Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния*. 2018. № 4 (38). С. 54–64.
- Foggia M.D., D'Addona D.M. Identification of critical key parameters and their impact to zero-defect manufacturing in the investment casting process // *Procedia CIRP*. 2013. Vol. 12. P. 264–269.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.09.046>
- Дубровин В.К., Заславская О.М., Карпинский А.В. Производство отливок из цветных сплавов в объемные формы по выплавляемым моделям // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2011. № 2. С. 34–39.
- Abualigah L., Abd Elaziz M., Khasawneh A.M., Alshinwan M., Ibrahim R.A., Al-qaness M.A.A., Mirjalili S., Sumari P., Gandomi A.H. Meta-heuristic optimization algorithms for solving real-world mechanical engineering design problems: A comprehensive survey, applications, comparative analysis, and results // *Neural Computing & Applications*. 2022. Vol. 34. P. 4081–4110.
<https://doi.org/10.1007/s00521-021-06747-4>
- Xu M., Lekakh S.N., Richards V.L. Thermal property database for investment casting shells // *International Journal of Metalcasting*. 2016, vol. 10, no. 3. P. 342–347.
<https://doi.org/10.1007/s40962-016-0052-4>
- Perry M.C. Investment casting // *Advanced Materials & Processes*. 2008. Vol. 166. No. 6. P. 31–33.
- Pattnaik S., Karunakar D.B., Jha P.K. Developments in investment casting process – A review // *Journal of Materials Processing Technology*. 2012. Vol. 212. No. 11. P. 2332–2348.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.003>
- Harun Z., Kamarudin N.H., Badarulzaman N.A., Wahab M.S. Shell mould composite with rice husk // *Key Engineering Materials*. Vol. 471–472. P. 922–927.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.471-472.922>
- Zhou L. Xu J.F., Xu X.B. Construction of scientific evaluation system for energy saving and emission reduction oriented to product full life-cycle. *Applied Mechanics and Materials*. 2013, vol. 291–294, pp. 693–695.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.291-294.693>
- Kim S.K. Effect of product quality on life cycle assessment in aluminum die casting process. *Materials Science Forum*. 2007, vol. 544–545, pp. 259–262.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.544-545.259>
- Sata A., Ravi B. Bayesian inference-based investment-casting defect analysis system for industrial application. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, vol. 90, no. 9–12, pp. 3301–3315. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9614-0>
- Rodriguez A., López de Lacalle L.N., Calleja A., Lamikiz A.F. Maximal reduction of steps for iron casting one-of-a-kind parts. *Journal of Cleaner Production*. 2012, vol. 24, pp. 48–55.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.054>
- Investment Casting*. Ozerov V.A. ed. Moscow: Mashinostroenie, 1994, 448 p. (In Russ.)
- Zhilin S.G., Komarov O.N., Bogdanova N.A. Production of the steel casting with improved dimensional and geometrical accuracy using complex models. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 709, no. 3, article 033104.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/3/033104>
- Vidyarthi G., Gupta N. New development in investment casting process. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. 2017, vol. 8, no. 12, pp. 529–540.
- Sapchenko I.G., Zhilin S.G., Komarov O.N. *The Structure and Properties of Porous Combined Removable Models*. Vladivostok: Dal'nauka, 2007, 137 p. (In Russ.)
- Zhilin S.G., Bogdanova N.A., Komarov O.N. Influence of granulometric composition and extrusion ratio of waxy materials on geometry of extended compact by extruding forming. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.Ya. Yakovleva. Seriya: Mekhanika predel'nogo sostoyaniya*. 2018, no. 4 (38), pp. 54–64. (In Russ.)
- Foggia M.D., D'Addona D.M. Identification of critical key parameters and their impact to zero-defect manufacturing in the investment casting process. *Procedia CIRP*. 2013, vol. 12, pp. 264–269.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.09.046>
- Dubrov V.K., Zaslavskaya O.M., Karpinski A.V. Casting production from non-ferrous alloys in bulk molds of consumable patterns. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2011, no. 2, pp. 34–39. (In Russ.)
- Abualigah L., Abd Elaziz M., Khasawneh A.M., Alshinwan M., Ibrahim R.A., Al-qaness M.A.A., Mirjalili S., Sumari P., Gandomi A.H. Meta-heuristic optimization algorithms for solving real-world mechanical engineering design problems: A comprehensive survey, applications, comparative analysis, and results. *Neural Computing & Applications*, 2022, vol. 34, pp. 4081–4110.
<https://doi.org/10.1007/s00521-021-06747-4>
- Xu M., Lekakh S.N., Richards V.L. Thermal property database for investment casting shells. *International Journal of Metalcasting*. 2016, vol. 10, no. 3, pp. 342–347.
<https://doi.org/10.1007/s40962-016-0052-4>
- Perry M.C. *Investment casting*. *Advanced Materials & Processes*. 2008, vol. 166, no. 6, pp. 31–33.
- Pattnaik S., Karunakar D.B., Jha P.K. Developments in investment casting process – A review. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012, vol. 212, no. 11, pp. 2332–2348.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.06.003>
- Harun Z., Kamarudin N.H., Badarulzaman N.A., Wahab M.S. Shell mould composite with rice husk. *Key Engineering Materials*, vol. 471–472, pp. 922–927.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.471-472.922>

17. Жилин С.Г., Сапченко И.Г., Комаров О.Н. Упругий отклик прессовок при деформировании гетерогенных порошковых материалов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2015. № 4 (26). С. 185–192.
18. Sosnin A.A., Bogdanova N.A., Zhilin S.G., Komarov O.N. Finite element modeling of the stress-strain state of waxy compacts // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2176. No. 1. Article 030017. <https://doi.org/10.1063/1.5135141>
19. Himran S., Suwono A. Characterization of alkanes and paraffin waxes for application as phase change energy storage medium // Energy Sources Journal. 1994. Vol. 16. No. 1. P. 117–128. <https://doi.org/10.1080/00908319408909065>
20. Ziabicki A. Structure and properties of polymers // AMAS Course of Random Material Microstructures RMM'04. Warsaw. February 2–4. 2004. P. 307–342.
21. Dixit U.S., Joshi S.N., Davim J.P. Incorporation of material behavior in modeling of metal forming and machining processes: A review // Materials & Design. 2011. Vol. 32. No. 7. P. 3655–3670. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.049>
22. Nicolaides D.B., Woodcock L.V. The rheology and phase structure of steady uniaxial compaction // Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications. 1997. Vol. 240. No. 1–2. P. 374–395. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(97\)00160-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(97)00160-X)
23. Shtern M.B. Density-pressure dependence and density distribution during powder pressing // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2014. Vol. 53. No. 3–4. P. 139–147. <https://doi.org/10.1007/s11106-014-9596-0>
24. Aryanpour G., Mashl S., Warke V. Elastoplastic-viscoplastic modeling of metal powder compaction: application to hot isostatic pressing // Powder Metallurgy. 2013. Vol. 56. No. 1. P. 14–23. <https://doi.org/10.1179/1743290112Y.0000000027>
25. Рожкова Г.В., Кусков В.Н., Смолин Н.И. Исследование влияния межчастичных контактов на процесс предварительного прессования порошкового материала // Агропродовольственная политика России. 2017. № 11 (71). С. 140–144.
26. Теория и практика процесса прессования гетерофазных увлажненных механических смесей на основе железа / В.Н. Кокорин, А.И. Рудской, В.И. Филимонов, Е.М. Бульжев, С.Ю. Кондратьев. Ульяновск: УлГТУ, 2012. 236 с.
27. Цеменко В.Н., Фук Д.В., Ганин С.В. Определение реологических характеристик и моделирование процесса экструзии порошковых и пористых материалов. Часть 2. Пористое тело // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2016. № 2(243). С. 134–143.
28. Morvan A., Grosseau-Poussard J.-L., Caillault N., Delange F., Roure S., Lepretre P., Silvain J.-F. Powder processing methodology for fabrication of Copper / Graphite composite materials with enhanced thermal properties // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2019. Vol. 124. Article 105474. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105474>
29. Горохов В.М., Дорошкевич Е.А., Звонарев Е.В. Теоретические основы моделирования упруго-пластического поведения металлических порошков при прессовании в жесткой матрице // 50 лет порошковой металлургии Беларуси. История, достижения, перспективы. Минск, 2010. С. 158.
30. Aleksandrova E.A., Aleksandrov B.L., Krasavtsev B.E. Structural and mechanical properties of paraffin wax composites // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2018. Vol. 54. No. 1. P. 37–43. <https://doi.org/10.1007/s10553-018-0895-x>
31. Doudard K., Arhaliass A., Loisel C., Gonçalves O., Legrand J., Saint-Jalmes S., Pouliquen M. A new approach to optimize compression of paraffin materials: influence of particles size and shape // International Journal of Material Forming. 2018. Vol. 11. No. 2. P. 247–256. <https://doi.org/10.1007/s12289-017-1348-5>
32. Сапченко И.Г., Жилин С.Г., Комаров О.Н. Улучшение экологии литья по выплавляемым моделям использованием пористых удаляемых моделей // Безопасность жизнедеятельности. 2009. № 2. С. 29–33.
17. Zhilin S.G., Sapchenko I.G., Komarov O.N. Elastic response of compacts from heterogeneous powder material during deformation. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.Ya. Yakovleva. Seriya: Mekhanika predel'nogo sostoyaniya*. 2015, no. 4 (26), pp. 185–192. (In Russ.).
18. Sosnin A.A., Bogdanova N.A., Zhilin S.G., Komarov O.N. Finite element modeling of the stress-strain state of waxy compacts. *AIP Conference Proceedings*. 2019, vol. 2176, no. 1, article 030017. <https://doi.org/10.1063/1.5135141>
19. Himran S., Suwono A. Characterization of alkanes and paraffin waxes for application as phase change energy storage medium. *Energy Sources Journal*. 1994, vol. 16, no. 1, pp. 117–128. <https://doi.org/10.1080/00908319408909065>
20. Ziabicki A. Structure and properties of polymers. *AMAS Course of Random Material Microstructures RMM'04, February 2–4. 2004, Warsaw*, pp. 307–342.
21. Dixit U.S., Joshi S.N., Davim J.P. Incorporation of material behavior in modeling of metal forming and machining processes: A review. *Materials & Design*. 2011, vol. 32, no. 7, pp. 3655–3670. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.049>
22. Nicolaides D.B., Woodcock L.V. The rheology and phase structure of steady uniaxial compaction. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*. 1997, vol. 240, no. 1–2, pp. 374–395. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(97\)00160-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(97)00160-X)
23. Shtern M.B. Density-pressure dependence and density distribution during powder pressing. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2014, vol. 53, no. 3–4, pp. 139–147. <https://doi.org/10.1007/s11106-014-9596-0>
24. Aryanpour G., Mashl S., Warke V. Elastoplastic-viscoplastic modeling of metal powder compaction: application to hot isostatic pressing. *Powder Metallurgy*. 2013, vol. 56, no. 1, pp. 14–23. <https://doi.org/10.1179/1743290112Y.0000000027>
25. Rozhkova G.V., Kuskov V.N., Smolin N.I. Influence of inter-particle contacts on preliminary compacting of powder material. *Agroprodovol'stvennaya politika Rossii*. 2017, no. 11 (71), pp. 140–144. (In Russ.).
26. Kokorin V.N., Rudskoi A.I., Filimonov V.I., Bulyzhev E.M., Kondrat'ev S.Yu. *Theory and Practice of Compacting of Iron-Based Heterophase Wet Mechanical Mixtures*. Ul'yanovsk: UISTU, 2012, 236 p. (In Russ.).
27. Tsemenko V.N., Fuk D.V., Ganin S.V. Determining the rheological characteristics and modeling the extrusion of powder and porous materials. Part 2. Porous body. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2016, no. 2 (243), pp. 134–143. (In Russ.).
28. Morvan A., Grosseau-Poussard J.-L., Caillault N., Delange F., Roure S., Lepretre P., Silvain J.-F. Powder processing methodology for fabrication of Copper. Graphite composite materials with enhanced thermal properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2019, vol. 124, article 105474. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105474>
29. Gorokhov V.M., Doroshkevich E.A., Zvonarev E.V. Theoretical foundations for modeling elastic-plastic behavior of metal powders when compacting in a rigid matrix. In: *50 Years of Powder Metallurgy in Belarus. History, Achievements, Prospects*. Minsk, 2010, p. 158. (In Russ.).
30. Aleksandrova E.A., Aleksandrov B.L., Krasavtsev B.E. Structural and mechanical properties of paraffin wax composites. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 2018, vol. 54, no. 1, pp. 37–43. <https://doi.org/10.1007/s10553-018-0895-x>
31. Doudard K., Arhaliass A., Loisel C., Gonçalves O., Legrand J., Saint-Jalmes S., Pouliquen M. A new approach to optimize compression of paraffin materials: Influence of particles size and shape. *International Journal of Material Forming*. 2018, vol. 11, no. 2, pp. 247–256. <https://doi.org/10.1007/s12289-017-1348-5>
32. Sapchenko I.G., Zhilin S.G., Komarov O.N. Improving ecology of investment casting using porous removable patterns. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2009, no. 2, pp. 29–33. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Геннадьевич Жилин, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник, Институт машиноведения и металлургии Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН

ORCID: 0000-0002-0865-7109

E-mail: sergeyzhilin1@rambler.ru

Нина Анатольевна Богданова, младший научный сотрудник, Институт машиноведения и металлургии Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН

ORCID: 0000-0002-8769-8194

E-mail: joyful289@inbox.ru

Олег Николаевич Комаров, к.т.н., доцент, директор, Институт машиноведения и металлургии Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения РАН

ORCID: 0000-0002-7121-4271

E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru

Sergei G. Zhilin, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Leading Researcher*, Institute of Metallurgy and Mechanical Engineering of Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-0865-7109

E-mail: sergeyzhilin1@rambler.ru

Nina A. Bogdanova, *Junior Researcher*, Institute of Metallurgy and Mechanical Engineering of Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-8769-8194

E-mail: joyful289@inbox.ru

Oleg N. Komarov, *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Director*, Institute of Metallurgy and Mechanical Engineering of Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0002-7121-4271

E-mail: olegnikolaevitsch@rambler.ru

Поступила в редакцию 14.10.2022

После доработки 20.10.2022

Принята к публикации 22.10.2022

Received 14.10.2022

Revised 20.10.2022

Accepted 22.10.2022

*Оригинальная статья*

УДК 621.771.2

DOI 10.17073/0368-0797-2022-11-769-777

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2430>

КОНЦЕПЦИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ КАЛИБРОВКИ СОРТОПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ. СООБЩЕНИЕ 4. ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ КАЛИБРОВКИ

А. М. Михайленко, Д. Л. Шварц

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. В рамках разрабатываемой на кафедре обработки металлов давлением Уральского федерального университета (УрФУ) «Концепции оптимальной калибровки УрФУ», калибровка сортопрокатных валков рассматривается с позиций системного анализа. Калибровка, как технологическая система, может быть изменена двумя путями: изменяя структуру системы, что соответствует изменению формы калибров, и изменяя управление системой, что соответствует изменению обжатий по проходам в одних и тех же калибрах, т. е. изменяя режим обжатий. Оптимальной можно признать калибровку, содержащую такие калибры и реализующую такой режим обжатий, которые обеспечивали бы экстремальные свойства у заданных целевых функций, зависящих от указанных параметров. В предыдущих сообщениях этой серии рассмотрена общая концепция двухэтапной оптимизации калибровки, предусматривающая последовательное проведение оптимизации схемы калибровки (первый этап оптимизации) и применяемого режима обжатий (второй этап). Также рассмотрены процедуры построения оптимизационного пространства для первого этапа – пространства виртуальных схем калибровок, формируемого при помощи специального генератора таких схем и перечня всех видов и типов калибров, возможных для использования на данной конкретной стадии прокатки – пространства калибров. Для расчета целевой функции критерия оптимальности схемы калибровки вводится понятие «пространство эффективности калибров». Формирование этого пространства производится с использованием формализованной процедуры экспертного оценивания степени влияния различных допустимых форм калибров, применяемых в калибровке на разноплановые технологические, экономические и других характеристики конкретного сортопрокатного стана. Целевая функция рассчитывается как дисперсия интегральных показателей эффективности калибров, входящих в калибровку относительно гипотетического «идеального» калибра, обладающего наилучшими значениями выбранных показателей эффективности. Оптимальной признается схема калибровки, соответствующая минимальному значению целевой функции.

Ключевые слова: сортовая прокатка, калибровка прокатных валков, калибр, системный анализ, оптимизация калибровки валков, пространство схем калибровок, пространство эффективности

Для цитирования: Михайленко А.М., Шварц Д.Л. Концепция оптимальной калибровки сортопрокатных валков. Сообщение 4. Оптимизация схемы калибровки // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 11. С. 769–777. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-769-777>

Original article

THE CONCEPT OF OPTIMAL BAR ROLL PASS DESIGN. REPORT 4. OPTIMIZATION OF ROLL PASS DESIGN SCHEME

A. M. Mikhailenko, D. L. Shvarts

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

Abstract. Roll pass design of shape rolling rolls is considered from the standpoint of system analysis within “UrFU concept of optimal roll pass design” created in the Chair “Metal Forming” of the Ural Federal University. Roll pass design as a technological system can be changed in two methods: 1) changing the structure of the system which corresponds to a change in the groove shape; 2) changing the control of the system, which corresponds to changing reduction through the pass in the grooves, that is, by changing the reduction mode. Roll pass design that compose of the definite grooves and realize the definite reduction mode, which assures of optimal properties of preassigned objective function depending on the specified parameters, is considered optimal. General conception of two-stage optimization of roll pass design: consistent conduct of optimization of roll pass design scheme (first stage of optimization) and mode of reduction (second stage of optimization), was considered in previous reports. Procedures of formation of optimization space for first stage – space of virtual schemes of roll pass design generated by the special generator and set of all possible types of grooves that can be used at this particular stage of rolling, were also described. To calculate the objective function of the optimality criterion of the roll pass design scheme, the authors introduced the concept of “space of grooves efficiency”. Formation of this space is carried out using a formalized procedure for expert evaluation of the degree of influence of various permissible forms of grooves used in roll pass design on the diverse technological, economic and other characteristics of a particular rolling mill. The objective function is calculated as variance of integral performance indicators of

the grooves included in the roll pass design relative to the hypothetical “ideal” groove with the best values of the selected performance indicators. The roll pass design scheme corresponding to the minimum value of the objective function is considered the best.

Keywords: section rolling, roll pass design, groove, system analysis, optimization of roll pass design, space of scheme of roll pass design, space of efficiency

For citation: Mikhailenko A.M., Shvarts D.L. The concept of optimal bar roll pass design. Report 4. Optimization of roll pass design scheme. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 11, pp. 769–777. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-769-777>

В рамках разрабатываемой «Концепции оптимальной калибровки» в работе [1] описана общая идея и схема оптимизации калибровки валков, пригодная для самого широкого спектра профилей проката. Оптимизационная модель основана на применении системного подхода к анализу сложных технических и технологических комплексов [2 – 5], к которым относится и любая калибровка сортопрокатных валков. Изменения функционирования любой системы возможно достичь двумя путями: меняя структуру системы [6 – 8] и меняя управление системой [9 – 10]. В калибровке валков эти пути соответствуют изменению схемы калибровки (за счет применения калибров различной конфигурации) и режима обжатий (перераспределению обжатий металла по проходам). Несмотря на очевидную связь схемы калибровки и режима обжатий, их можно рассматривать и оптимизировать последовательно, учитывая имеющиеся на практике возможности раздельного изменения того и другого (например, изменять форму калибров за счет переточки валков и режим обжатий за счет изменения межвалкового зазора). Выбранный авторами путь поэтапной, двухстадийной оптимизации обоснован весьма высокой сложностью и, главное, многовариантностью решаемой задачи.

Общая оптимизационная модель логически разбита на ряд блоков формирования и обработки информации, каждый из которых заслуживает отдельного рассмотрения и изложения. В работе [11] изучена структура, назначение и содержание информационного блока «пространство калибров». В этом пространстве все калибры, принципиально применимые для прокатки данного профиля и конкретного прокатного стана, упорядочены в координатах выбранных свойств калибров. Также приведены примеры дискретных пространств калибров, применяемых при производстве рельсов и швеллеров. Основой для наполнения пространства калибров явились известные промышленные калибровки [12 – 14]. В работе [15] описаны принципы формирования информационного блока, отражающего «пространство схем калибровок», являющееся первым пространством оптимизации (в соответствии с моделью [1]). Пространство схем калибровок формируется с использованием рассмотренного ранее пространства калибров [11] и определенного алгоритма, отражающего специфику конкретного профиля проката. В работах [15 – 16] приведены примеры формирования пространств схем калибровок для прокатки рельсов и швеллеров.

В настоящей статье рассматриваются процедуры выбора оптимальной схемы калибровки из сформированного ограниченного пространства виртуальных схем [15 – 16] для условий прокатки конкретного профиля на конкретном прокатном стане. Такая задача выбора «наилучшей структуры из имеющегося множества возможных структур» является типичной задачей поиска оптимума. Разнообразные варианты ее решения широко освещены в работах [17, 18].

Все известные методы оптимизации (линейное программирование, динамическое программирование, стохастическое программирование и др.) основаны на использовании некоторого «критерия оптимальности». В математической и технической литературе можно встретить достаточно широкую, и не всегда однозначную трактовку термина «критерий оптимальности». Поэтому сформулируем определение этого термина по аналогии с близким по сути понятием «статистический критерий», определенным в ISO 3534-1:2006 (ГОСТ Р ИСО 3534-1 – 2019) [19] следующим образом: «статистический критерий (statistical test) – процедура, предназначенная для принятия решения о том, может ли быть отклонена нулевая гипотеза в пользу альтернативной гипотезы». В ранее действовавших стандартах – в ГОСТ Р 50779.10 – 2000: «статистический критерий – статистический метод принятия решений о том, стоит ли отвергнуть нулевую гипотезу в пользу альтернативной или нет», в ГОСТ 15895-77: «статистический критерий – однозначно определенный способ проверки статистических гипотез». Ключевыми словами в этих определениях являются слова «процедура», «метод», «способ». Используя аналогию, получим следующее определение. Критерий оптимальности схемы калибровки – это однозначно определенный метод (способ, процедура) поиска схемы калибровки, наилучшим образом удовлетворяющей цели (или целям) оптимизации.

При таком понимании критерий оптимальности, как метод принятия решения, должен включать в свой состав:

- цель оптимизации;
- пространство оптимизации (в данном случае это сформированное ранее «пространство схем калибровок», например, для рельсов [11] и швеллеров [16]);
- целевую функцию, зависящую от параметров пространства оптимизации и отвечающую цели оптимизации;
- метод поиска оптимума;
- правило принятия решения.

Целевая функция (обозначим Q) неразрывно связана с целью оптимизации, поэтому имеет смысл рассматривать эти две компоненты критерия оптимальности совместно.

В условиях современного товарного сортопрокатного производства к калибровке прокатных валков предъявляется множество разнообразных требований: формирование заданной геометрии прокатываемого профиля, обеспечение требуемой производительности стана, минимизация расхода энергии и себестоимости, формирование заданной структуры, свойств и т. д. При этом, с точки зрения калибровки, эти требования часто являются не только разнородными, но иногда и противоречивыми. Любое требование, предъявленное к калибровке, можно рассматривать как отдельную «частную цель», каждую из которых хотелось бы достичь, причем одновременно, т. е. используя одну и ту же калибровку. Наличие разнородных требований к калибровке при формировании целевой функции неизбежно приводит к возникновению так называемой «проблемы неопределенности цели». Формируя различные целевые функции, например, на основе выбора какой-то из целей в качестве «главной цели», в результате соответствующей оптимизации будут получены разные калибровки. Данная причина, а также различия в ограничениях калибровки (конструкция прокатного стан, вид заготовки и т. п.) привели к тому, что в истории мировой сортопрокатной практики для производства одних и тех же (или подобных) профилей применялся и применяется довольно широкий спектр разнообразных схем калибровки валков.

Наиболее простым методом преодоления неопределенности цели при формировании целевой функции является процедура «выбора главной цели» и использования остальных целей в качестве ограничений пространства оптимизации. Однако в условиях современного прокатного производства такого простого подхода уже недостаточно. Необходимо использовать «многоцелевые» критерии оптимальности. Авторами поставлена задача сформулировать некую комплексную целевую функцию, позволяющую одновременно достигать максимально широкого спектра разноплановых целей если не на оптимальном, то на технологически рациональном уровне каждой частной цели. Причем критерий оптимальности должен быть адаптивным, настраиваемым, способным менять приоритеты в соответствии с конкретной производственной, рыночной, экономической и другой ситуацией.

Сформулированная таким образом задача оптимизации калибровки является задачей «многоцелевой оптимизации» или, как чаще называют в специальной литературе [20–23], «задачей многокритериальной оптимизации» (МКО-задача). Классическим решением МКО-задач является формирование «множества Парето», «фронта Парето» или «множества Слейтера». Однако этот путь приводит лишь к выявлению множества

возможных решений МКО-задачи, а окончательный выбор единственного решения из этого множества возможен лишь на основе предпочтений так называемого «лица, принимающего решение» (ЛПР), часто весьма субъективных. Известно довольно большое количество алгоритмов формализации предпочтений ЛПР, позволяющих обосновать единственное решение МКО-задачи. Однако не все из них возможно применить к решению задачи оптимизации схемы калибровки, что связано со сложностями абсолютной формализации калибровки.

Одним из наиболее простых и универсальных путей решения МКО-задач является применение так называемой «свертки критериев», фактически сводящей решение МКО-задачи к однокритериальной задаче со сложной (составной) целевой функцией. Метод свертки критериев также не лишен субъективизма ЛПР, однако при условии привлечения известных процедур повышения объективности (например, за счет учета мнений максимально большого числа экспертов), представляется более подходящим для рассматриваемого случая.

Общая процедура формирования целевой функции Q может быть представлена в виде структурной схемы, показанной на рисунке.

Исходя из самых общих представлений об эффективности сортопрокатного производства, в качестве частных целей оптимизации схемы калибровки выбраны цели и показатели, приведенные в табл. 1.

В данном случае не удалось учесть все возможные частные цели оптимизации схемы калибровки, которые могут встретиться на практике. Однако в каждом конкретном случае список из табл. 1 может быть как расширен, так и сокращен, что не влияет на принципиальную суть рассматриваемого ниже критерия оптимальности.

Поставим в соответствие каждой i -й частной цели оптимизации схемы калибровки из табл. 1 одноименный «частный показатель эффективности g_i ». Число-



Последовательность формирования целевой функция критерия оптимальности схемы калибровки

Subsequence of formation of objective function of the optimality criterion of the roll pass design scheme

Частные цели оптимизации схемы калибровки и их характеристики

Table 1. Particular objectives of optimization of the roll pass design scheme and their characteristics

Номер, i	Назначение частной цели	Частная цель оптимизации и соответствующий частный показатель эффективности g_i	Целевое направление g_i^{extr}	Ранг влиятельности цели, A_i
1	Формирование качества	Стабильность формоизменения	Максимум	13
2		Вероятность образования дефектов	Минимум	14
3		Склонность к износу	Минимум	11
4		Возможность утяжки	Минимум	12
5		Сложность настройки и подстройки	Минимум	10
6	Затраты на валки и привалковую арматуру	Величина начального диаметра	Минимум	9
7		Использование бочкового пространства	Максимум	8
8		Необходимая ширина бурта	Минимум	7
9		Возможность сопряжения калибров	Максимум	0
10		Глубина вреза	Минимум	6
11		Сложность привалковой арматуры	Минимум	4
12		Величина переточки при ремонте	Минимум	5
13	Энергозатраты	Сила прокатки	Минимум	2
14		Крутящий момент прокатки	Минимум	3
15		Воздействие на привалковую арматуру	Минимум	1

вые значения показателей g_i должны описывать степень соответствия калибров, составляющих калибровку, целевому направлению i -й частной цели оптимизации g_i^{extr} (4-й столбец в табл. 1). Способ установления числовых значений частных показателей эффективности g_i рассмотрен ниже.

Используем выбранные частные показатели эффективности g_i в качестве координат некоего пространства, названного «пространство эффективности калибров». Для указанных в табл. 1 пятнадцати частных целей оптимизации это будет 15-ти мерное пространство. В этом пространстве для каждого калибра с номером k полный набор конкретных числовых значений g_i будет представлять собой точку с координатами g_{ik} . Назовем такую точку «точка эффективности калибра G » с координатами g_i , т. е. $G(g_i)$.

Сформированные авторами в качестве примеров пространства калибров для прокатки рельсов [11] и швеллеров [16] являются пространствами сложных геометрических объектов. Эти пространства упорядочивают входящие в них калибры по их геометрическим признакам, не имеющим простого и однозначного числового описания, поэтому использованные уровни варьирования этих признаков носят описательный, качественный характер.

Для упорядочения пространства рельсовых калибров были использованы три координаты (три признака классификации калибров): Т – «вид калибра» (6 уровней изменения координаты); С – «симметричность ка-

либра» (4 уровня); Р – «тип закрытия калибра» (7 уровней) [11]. Для описания пространства швеллерных калибров пришлось использовать четыре координаты: С – «вид стенки» (4 уровня изменения координаты); Д – «вид действительных фланцев» (5 уровней); Л – «вид ложных фланцев» (3 уровня); Р – «тип закрытия калибра» (5 уровней) [16].

В принципе, используя какую-то обобщенную геометрическую модель калибра (например, матрично-векторное описание [24, 25] или обобщенный метод описания калибров [26, 27]), вполне возможно использовать координаты пространства калибров, имеющие и количественное выражение. Однако размерность такого геометрического пространства будет существенно зависеть от вида прокатываемого профиля и типов применяемых калибров. Чем сложнее геометрическая форма калибра, тем больше будет размерность пространства. Но даже для калибров простой формы размерность пространства калибров будет весьма высока. Например, при использовании матрично-векторного подхода в работе [28] было использовано «двухсотвекторное описание четверти простого калибра». Для подробного же описания калибров более сложной конфигурации (например, рельсовых или швеллерных) размерность пространства калибров может достигать нескольких тысяч. При таких условиях проведение поиска оптимума становится или практически невозможным, или весьма затратным по времени даже с использованием наиболее современных алгоритмов [20] и вычислитель-

ной техники. Именно по этой причине был выбран более простой качественный способ описания координат пространства калибров.

Однако данный способ описания координат пространства калибров имеет существенный недостаток. Он не позволяет напрямую построить функциональные зависимости показателей эффективности калибров g_i от этих координат пространства калибров с использованием обычных аналитических методов. Скорее всего, единственным известным способом решения такого класса задач является использование методов экспертной оценки [29] и ранжирования [30]. В соответствии с этой идеологией, необходимо каждому из уровней n каждой координаты j пространства калибров экспертно присвоить ранг R_{ijn} по каждому из показателей эффективности g_i из табл. 1, учитывая целевое направление g_i^{extr} рассматриваемого показателя эффективности g_i , указанного в предпоследнем столбце этой таблицы. В обозначении ранга калибра R_{ijn} принято: i – порядковый номер показателя эффективности g_i из табл. 1; j – координата пространства калибров (координатная ось); n – значения уровня j -й координаты пространства калибров. Например, для пространства рельсовых калибров [11] координата $j \in \{T, C, P\}$, а для пространства швеллерных калибров [16] $j \in \{C, Д, Л, P\}$. Количество уровней n по каждой из этих координат приведено выше.

Экспертное назначение рангов калибров R_{ijn} производится с использованием следующего набора правил:

– чем «лучше» уровень n текущей координаты j по рассматриваемому показателю эффективности g_i ,

чем сильнее он приближает виртуальную схему калибровки к гипотетической «идеальной калибровке», тем меньше у него числовое значение ранга R_{ijn} (для рассматриваемого частного показателя эффективности g_i , при наилучшем уровне n текущей координаты j , $R_{ijn} = 1$);

– при одинаковой влиятельности двух или более уровней n координаты j на рассматриваемый показатель эффективности g_i , всем этим уровням присваивается одинаковый ранг R_{ijn} ;

– если какая-то координата j пространства калибров, по мнению экспертов, не оказывает влияния на рассматриваемый показатель эффективности, то для всех значений n этой координаты принимается одинаковое значение ранга $R_{ijn} = 0$.

Примеры результатов ранжирования, проведенного по указанным правилам для показателей эффективности g_i из табл. 1 по одной из координат пространств калибров приведены в табл. 2 (для пространства рельсовых калибров) и табл. 3 (для пространства швеллерных калибров).

Виды рельсовых калибров, закрепленных на каждом уровне n координаты Т приведены в работе [11]. Виды швеллерных калибров, закрепленных на каждом уровне n координаты Р приведены в работе [16].

Аналогичные таблицы сформированы и для других координат рассмотренных пространств рельсовых и швеллерных калибров.

Ранжирование пространств рельсовых и швеллерных калибров, показанное в табл. 2 и 3, проведено лишь

Т а б л и ц а 2

Ранги R_{ijn} пространства рельсовых калибров в зависимости от уровня n координаты $j = T$ – «вид калибра»

Table 2. Grades R_{ijn} of space of rail grooves depending on the level n of coordinate $j = T$ – “kind of groove”

i	Показатель эффективности g_i	Уровень n координаты Т						R_{iTmax}
		1	2	3	4	5	6	
1	Стабильность формоизменения	6	3	5	1	4	2	6
2	Вероятность образования дефектов	3	4	6	5	1	2	6
3	Склонность к износу	3	4	5	6	6	2	6
4	Возможность утяжки	2	1	3	6	5	3	6
5	Сложность настройки и подстройки	4	4	2	1	3	5	5
6	Величина начального диаметра	2	4	5	5	5	3	5
7	Использование бочкового пространства	1	2	3	3	4	1	4
8	Необходимая ширина бурта	2	3	4	5	6	1	6
9	Возможность сопряжения калибров	1	2	4	3	5	4	5
10	Глубина вреза	2	3	5	5	4	3	5
11	Сложность привалковой арматуры	1	2	4	2	4	3	4
12	Величина переточки при ремонте	2	3	4	5	4	2	5
13	Сила прокатки	2	4	5	6	3	1	6
14	Крутящий момент прокатки	3	4	6	1	5	2	1
15	Воздействие на привалковую арматуру	3	4	5	6	1	2	1

Ранги R_{ijn} пространства швеллерных калибров в зависимости от уровня n координаты $j = P$ – «тип закрытия калибра и количество валков, образующих калибр»

Table 3. Grades R_{ijn} of space of channel grooves depending on the level n of coordinate $j = P$ – “type of groove closure and the number of rolls forming the groove”

i	Показатель эффективности g_i	Уровень n координаты P					R_{iPmax}
		1	2	3	4	5	
1	Стабильность формоизменения	3	2	1	1	2	3
2	Вероятность образования дефектов	3	2	5	1	4	5
3	Склонность к износу	2	3	5	4	1	5
4	Возможность утяжки	3	4	1	5	2	4
5	Сложность настройки и подстройки	5	4	1	3	2	5
6	Величина начального диаметра	2	3	3	4	1	4
7	Использование бочкового пространства	2	3	3	4	1	4
8	Необходимая ширина бурта	2	3	4	4	1	4
9	Возможность сопряжения калибров	2	4	3	5	1	5
10	Глубина вреза	2	3	4	5	1	5
11	Сложность привалковой арматуры	4	3	2	2	1	4
12	Величина переточки при ремонте	2	3	4	4	1	4
13	Сила прокатки	2	3	4	3	1	4
14	Крутящий момент прокатки	1	2	5	4	3	5
15	Воздействие на привалковую арматуру	2	3	5	4	1	5

с учетом экспертного мнения авторов статьи, причем из наиболее общих соображений, без учета специфики конкретного прокатного стана, типоразмера профиля и других аспектов, несомненно чрезвычайно важных для реальной практики. Для повышения объективности значений ранговых оценок в конкретных производственных условиях следует учитывать мнения максимально большого числа экспертов, причем желательно, не только из числа работников данного предприятия, но и с привлечением известных специалистов сортопрокатчиков из сторонних организаций. Сбор мнений экспертов и статистическую обработку результатов опроса можно провести в соответствии с известными методами [29, 30].

В соответствии с принятой системой назначения рангов, наибольшая величина ранга для каждого из показателей эффективности g_i при разных координатах j может отличаться. Поэтому для исходного выравнивания влияния показателей эффективности g_i на значение формируемой целевой функции Q произведем нормирование рангов R_{ijn}

$$r_{ijn} = \frac{R_{ijn}}{R_{ijmax}}, \quad (1)$$

где R_{ijmax} – наибольшее значение ранга для каждого из сочетаний i и j (наибольшее значение для каждой из

строк в табл. 2 и 3 приведено в последнем столбце этих таблиц).

В результате нормирования, табл. 2 и 3 будут преобразованы в аналогичные по структуре таблицы нормированных ранговых значений r_{ijn} , каждое из которых находится в диапазоне значений $0 \leq r_{ijn} \leq 1$.

Для каждого k -го калибра расчет числовых значений координат точки эффективности $G_k(g_{ki})$ произведем путем свертки нормированных ранговых значений r_{ijk} по всем координатам j пространства калибров в виде их произведения

$$g_{ki} = \prod_{j=T,C,P} r_{ijn}. \quad (2)$$

Значение общего интегрального показателя эффективности k -го калибра G_k^Σ найдем как линейную комбинацию координат вектора эффективности $G_k(g_{ki})$. Однако при этом необходимо учесть, что в разных экономических, технических и прочих условиях реального прокатного стана приоритетность, влияние каждого из используемых показателей эффективности g_i на конечный выбор того или иного калибра может быть различной. Для учета этого обстоятельства, в расчетное выражение для G_k^Σ в качестве коэффициентов линейной комбинации введем весовые коэффициенты a_i (будем называть их «коэффициенты влияния цели»). При таком подходе, выражение для расчета

общего показателя эффективности k -го калибра будет иметь вид

$$G_k^\Sigma = \sum_{i=1}^{N_g} a_i g_{ki}, \quad (3)$$

где N_g – количество используемых показателей эффективности (в данном примере 15).

Коэффициент влияния цели a_i должен отражать степень изменения значения общего показателя эффективности G_k^Σ под воздействием изменения уровня соответствующего частного показателя эффективности g_i . Чем более значима i -я частная цель оптимизации, тем к большим изменениям G_k^Σ должно приводить изменение нормированной величины g_i . При использовании качественного способа описания уровней варьирования координат пространства калибров установить числовые значения коэффициентов влияния a_i на основе физических, технических, экономических или каких-то других строгих и объективных закономерностей невозможно. Поэтому для выбора величин этих коэффициентов также будем использовать процедуры экспертного ранжирования и нормирования, аналогичные рассмотренным выше, используя следующий алгоритм.

На основании экспертного мнения каждой i -ой частной цели оптимизации устанавливается ранг влияния A_i , используя следующие правила:

- наименее значимая частная цель имеет ранг, равный 1;
- чем более значима цель, тем выше числовое значение ее ранга влияния;
- при одинаковой значимости показателей их ранги совпадают;
- если, по мнению экспертов, какой-то показатель не имеет значения, то для всех калибров ($k = 1, 2, \dots, N_k$, где N_k – количество калибров в калибровке) следует принять значение $A_i = 0$.

В последней колонке табл. 1 приведено одно из возможных распределений рангов влияния A_i частных целей оптимизации.

Коэффициент влияния рассчитывается как нормированное значение ранга влияния

$$a_i = \frac{A_i}{A_{\max, i}}, \quad (4)$$

где $A_{\max, i}$ – наибольшее значение ранга влияния.

Возможны и другие принципы установления значений коэффициентов a_i , например, как доля от 1, так, чтобы выполнялось условие нормирования $\sum_{i=1}^{N_g} a_i = 1$.

Любая виртуальная схема калибровки валков представляет собой определенную последовательность определенных калибров, а, значит, наследует те свойства, которыми обладают калибры, составляющие эту

схему. Поэтому целевая функция Q критерия оптимальности виртуальной схемы калибровки в целом может быть составлена из рассмотренных выше общих показателей эффективности отдельных калибров G_k^Σ .

В пространстве эффективности калибров существует единственная точка, в которой каждый из частных показателей эффективности g_i примет свое экстремальное значение g_i^{extr} , наилучшим образом удовлетворяющее i -й частной цели оптимизации. Эта точка будет определять некий гипотетический, идеальный калибр. Такому «идеальному калибру» в пространстве эффективности калибров $G(g_i)$ будет соответствовать «идеальная точка эффективности $G_k(g_i^{extr})$ ». Чем ближе каждая координата g_i окажется к соответствующей координате идеальной точки эффективности g_i^{extr} , тем в большей степени будет удовлетворена i -я частная цель оптимизации. Такое представление и будем использовать для формирования целевой функции Q .

В соответствии с принятыми правилами ранжирования калибров наилучшее значение ранга $R_{ijn} = 1$. После нормирования рангов по выражению (1) получим, что наилучшему уровню n координаты j будет соответствовать наименьшее значение нормированного ранга $r_{ij \min} = \frac{1}{R_{ij \max}}$.

По выражению (2) координаты идеальной точки эффективности составят $g_i^{extr} = \prod_{j=T,C,P} r_{ij \min}$, а общий показатель эффективности «идеального калибра», рассчитанный по выражению (3), будет равен

$$G_{extr}^\Sigma = \sum_{i=1}^{N_g} a_i g_i^{extr}.$$

Это наилучшее значение общего показателя эффективности G_{extr}^Σ калибра соответствует единственной наилучшей точке $G_{extr}(g_i^{extr})$ пространства эффективности калибров, причем будет одинаковым для любого k -го калибра любой виртуальной схемы калибровки.

Целевую функцию Q для всей виртуальной схемы калибровки можно формировать по-разному, например, как аддитивную функцию общих показателей эффективности калибров, входящих в схему калибровки. Однако, учитывая наличие в пространстве эффективности «идеальной» точки эффективности $G_{extr}(g_i^{extr})$, возможен и другой подход: рассчитывать целевую функцию Q как дисперсию общих показателей эффективности G_k^Σ всех N_k калибров, составляющих калибровку, относительно «идеального» значения $G_{extr}(g_i^{extr})$

$$Q = \frac{1}{N_k} \sum_{k=1}^{N_k} (G_k^\Sigma - G_{extr}^\Sigma)^2. \quad (5)$$

При таком методе определения целевой функции Q , наилучшая калибровка будет соответствовать условию минимума этой функции

$$Q = \min. \quad (6)$$

Учитывая относительную простоту метода расчета значения целевой функции Q , а также большое, но ограниченное количество виртуальных схем калибровок, калибровку с минимальным значением Q можно определить простым перебором виртуальных схем.

Выводы

В рамках общей концепции двухэтапной оптимизации сортопрокатной калибровки валков сформулирован критерий оптимальности схемы калибровки. Критерий формируется на основе использования формализованной процедуры экспертного метода выбора

и оценивания степени влияния форм калибров, применяемых в калибровке, на разноплановые технологические, экономические и другие характеристики реального сортопрокатного производства. Рассмотрены структура и последовательность формирования целевой функции, рассчитываемой как дисперсия интегральных показателей эффективности калибров, входящих в калибровку относительно гипотетического «идеального» калибра. Минимальное значение целевой функции соответствует наилучшей схеме калибровки, предназначенной для прокатки конкретного профиля проката в конкретных условиях конкретного прокатного стана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Михайленко А.М., Шварц Д.Л. Концепция оптимальной калибровки сортопрокатных валков. Сообщение 1. Общие положения // Известия вузов. Черная металлургия, 2018. Т. 61. № 1. С. 21–27. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-1-21-27>
2. Месарович М., Такаха Я. Общая теория систем: математические основы / Под ред. В. С. Емельянова; пер. с англ. Москва: Мир, 1978. 311 с.
3. Мороз А.И. Курс теории систем: Учебное пособие для вузов. Москва: Высшая школа, 1987. 304 с.
4. Skyttner L. *General Systems Theory: An Introduction*. Macmillan Press, 1996. 290 p.
5. Hester P.T., Adams K. MacG. *Systemic Decision Making: Fundamentals for Addressing Problems and Messes*. Springer, 2017. 414 p.
6. Huang B., Xing K., Spuzic S., Abhary K. Development of parameterized roll pass design based on a hybrid model // *ICMET 2010 – Int. Conf. on Mechanical and Electrical Technology, Proceedings*. 2010. P. 91–93. <https://doi.org/10.1109/ICMET.2010.5598326>
7. Lambiasi F., Langella A. Automated procedure for roll pass design // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2009. No. 18. P. 263–272. <https://doi.org/10.1007/s11665-008-9289-2>
8. Abhary K., Kovacic Z., Lundberg S.-E., Narayanan R., Spuzic S. The application of a hybrid algorithm to roll pass design // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 79. No. 5–6. P. 1063–1070. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6865-0>
9. Wang Q., Huang P., Yin Y. Design and optimization of rolling mills pass based on parameterization and orthogonal test // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 112. No. 3–4. P. 803–818. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06353-z>
10. Lapovok R.Ye., Thomson P.F. The mathematical basis of optimal roll pass design // *V-st Biennial Engineering Mathematics Conf. Melbourne*, 1994. P. 1–9.
11. Михайленко А.М., Шварц Д.Л. Концепция оптимальной калибровки сортопрокатных валков. Сообщение 2. Пространство калибров. // Известия вузов. Черная металлургия, 2018. Т. 61. № 5. С. 364–371. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-5-364-371>
12. Прокатка и калибровка. Т. V, VI / Б.М. Илюкович, Н.Е. Нехаев, С.Е. Меркурьев и др. Днепропетровск: Днепро-Вал, 2004.
13. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Калибровка прокатных валков: Учебное пособие для вузов. Издание 2-е, переработанное и дополненное. Москва: Теплотехника, 2010. 490 с.
14. Gupta N.K. *Steel Rolling. Principle, Process & Application*. London, 2021. 526 p.
1. Mikhailenko A.M., Shvarts D.L. The concept of optimal bar roll design. Report 1. Basic provisions. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 1, pp. 21–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-1-21-27>
2. Mesarovic M.D., Takahara Y. *General Systems Theory: Mathematical Foundations*. Elsevier Science, 1975, 322 p. (Russ. ed.: Mesarovich M.D., Takahara Ya. *Obshchaya teoriya sistem: matematicheskie osnovy*. Emel'yanov V.S. ed. Moscow: Mir, 1978, 311p.)
3. Moroz A.I. *Systems Theory. Textbook for Universities*. Moscow: Vysshaya shkola, 1987, 304 p. (In Russ.).
4. Skyttner L. *General Systems Theory: An Introduction*. Macmillan Press, 1996, 290 p.
5. Hester P.T., Adams K. MacG. *Systemic Decision Making: Fundamentals for Addressing Problems and Messes*. Springer, 2017, 414 p.
6. Huang B., Xing K., Spuzic S., Abhary K. Development of parameterized roll pass design based on a hybrid model. *ICMET 2010 – Int. Conf. on Mechanical and Electrical Technology, Proceedings*. 2010, pp. 91–93. <https://doi.org/10.1109/ICMET.2010.5598326>
7. Lambiasi F., Langella A. Automated procedure for roll pass design. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2009, no. 18, pp. 263–272. <https://doi.org/10.1007/s11665-008-9289-2>
8. Abhary K., Kovacic Z., Lundberg S.-E., Narayanan R., Spuzic S. The application of a hybrid algorithm to roll pass design. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, vol. 79, no. 5-6, pp. 1063–1070. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6865-0>
9. Wang Q., Huang P., Yin Y. Design and optimization of rolling mills pass based on parameterization and orthogonal test. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021, vol. 112, no. 3-4, pp. 803–818. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06353-z>
10. Lapovok R.Ye., Thomson P.F. The mathematical basis of optimal roll pass design. *V-st Biennial Engineering Mathematics Conference. Melbourne*, 1994, pp. 1–9.
11. Mikhailenko A.M., Shvarts D.L. The concept of optimal shaped roll pass design. Report 2. Calibers space. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 5, pp. 364–371. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-5-364-371>
12. Ilyukovich B.M. Nekhaev N.E., Merkur'ev S.E., etc. *Rolling and Pass Design*. Vols. V, VI. Dnepropetrovsk: Dnepro-Val, 2004. (In Russ.).
13. Smirnov V.K., Shilov V.A., Inatovich Yu.V. *Roll Pass Design. Tutorial for universities*. Moscow: Teplotekhnika, 2010. 490 p. (In Russ.).
14. Gupta N.K. *Steel Rolling. Principle, Process & Application*. London, 2021, 526 p.

15. Михайленко А.М., Шварц Д.Л. Концепция оптимальной калибровки сортопрокатных валков. Сообщение 3. Пространство схем калибровок // Известия вузов. Черная металлургия, 2019. Т. 62. № 1. С. 15–24. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-1-15-24>
16. Schwartz D.L., Mikhailenko A.M., Ustinova E.I. Method of optimization of roll calibration for channels. Groove space // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. 2020. Vol. 55. No. 3. P. 657–665.
17. Kirk D.E. Optimal Control Theory: An Introduction (Dover Books on Electrical Engineering). Dover Publications, 2004. 480 p.
18. Ackoff R.L., Sasieni M.W. Fundamentals of Operations Research. N.Y.: Wiley, 1968. 455 p.
19. ISO 3534-1:2006. Statistics – Vocabulary and symbols – Part 1: General statistical terms and terms used in probability.
20. Vasant P., Weber G.-W., Dieu V.N. Handbook of Research on Modern Optimization Algorithms and Applications in Engineering and Economics. IGI Global, 2016. 960 p.
21. Лотов А.В., Пospelova И.И. Многокритериальные задачи принятия решений: Учебное пособие. Москва: МАКС Пресс, 2008. 197 с.
22. Munier A., Hontoria E., Jimenez-Saez F. Strategic Approach in Multi-Criteria Decision Making: A Practical Guide for Complex Scenarios. Springer, 2019. 288 p.
23. Triantaphyllou E. Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study. Springer, 2000. 320 p.
24. Тулупов С.А. Матричный способ представления процесса формоизменения при прокатке в калибрах простой формы. Сообщение 1 // Известия вузов. Черная металлургия. 1989. Т. 32. № 12. С. 63–65
25. Тулупов С.А. Матричный способ представления процесса формоизменения при прокатке в калибрах простой формы. Сообщение 2 // Известия вузов. Черная металлургия. 1990. Т. 33. № 2. С. 48–50.
26. Медведев В.С., Шлимовичус В.Я., Любимый К.В. Аналитическое описание контуров калибров произвольной формы // Совершенствование технологии производства сортового проката и гнутых профилей. Харьков, 1989. С. 13–18.
27. Михайленко А.М., Смирнов В.К., Устинова Е.И. Обобщенная модель сортовой двухвалковой прокатки. Аналитическое описание калибра и заготовки // Труды XI Конгресса прокатчиков. Т. I. 2017. С. 313–322.
28. Левандовский С.А., Синицкий О.В., Ручинская Н.А. Опыт оптимизации формы калибров по критерию неравномерности деформации // Калибровочное бюро: Электронный научный журнал. 2014. Вып. 3. С. 52–80.
29. Ayyub B.M. Elicitation of Expert Opinions for Uncertainty and Risks. CRC Press, 2001. 328 p.
30. Орлов А.И. Теория принятия решений: Учебное пособие. Москва: Издательство «Март», 2004. 656 с.
15. Mikhailenko A.M., Shvarts D.L. The concept of optimal bar roll pass design. Report 3. Space of roll pass design schemes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 1, pp. 15–24. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-1-15-24>
16. Schwartz D.L., Mikhailenko A.M., Ustinova E.I. Method of optimization of roll calibration for channels. Groove space. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2020, vol. 55, no. 3, pp. 657–665.
17. Kirk D.E. *Optimal Control Theory: an Introduction*. Dover Publications, 2004, 480 p.
18. Ackoff R.L., Sasieni M.W. *Fundamentals of Operations Research*. N.Y.: Wiley, 1968, 455 p.
19. ISO 3534-1:2006. *Statistics – Vocabulary and symbols – Part 1: General statistical terms and terms used in probability*.
20. Vasant P., Weber G.-W., Dieu V.N. *Handbook of Research on Modern Optimization Algorithms and Applications in Engineering and Economics*. IGI Global, 2016, 960 p. (In Russ.).
21. Lotov A.V., Pospelova I.I. *Multi-Criteria Decision Making Tasks: Tutorial*. Moscow: MAKS Press, 2008, 197 p. (In Russ.).
22. Munier A., Hontoria E., Jimenez-Saez F. *Strategic Approach in Multi-Criteria Decision Making: a Practical Guide for Complex Scenarios*. Springer, 2019, 288 p.
23. Triantaphyllou E. *Multi-Criteria Decision Making Methods: a Comparative Study*. Springer, 2000, 320 p.
24. Tulupov S.A. Matrix method for representing the forming process during rolling in grooves of simple shape. Report 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1989, vol. 32, no. 12, pp. 63–65. (In Russ.).
25. Tulupov S.A. Matrix method for representing the forming process during rolling in grooves of simple shape. Report 2. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1990, vol. 33, no. 2, pp. 48–50. (In Russ.).
26. Medvedev V.S., Shlimovichus V.Ya., Lyubimiy K.V. Analytical description of the contours of grooves with arbitrary shape. In: *Improving the Technology for Production of Long Products and Roll-Formed Sections*. Kharkiv, 1989, pp. 13–18. (In Russ.).
27. Mikhailenko A.M., Smirnov V.K., Ustinova E.I. Generalized model of high-quality two-roll rolling. Analytical description of groove and workpiece. In: *Proceedings of the XI Congress of Rollers*. Vol. I. 2017, pp. 313–322. (In Russ.).
28. Levandovskii S.A., Sinitskii O.V., Ruchinskaya N.A. Experience in optimizing the shape of grooves according to the criterion of non-uniform deformation. *Kalibrovochnoe byuro: Electronic Scientific Journal*. 2014, no. 3, pp. 52–80. (In Russ.).
29. Ayyub B.M. *Elicitation of Expert Opinions for Uncertainty and Risks*. CRC Press, 2001, 328 p.
30. Orlov A.I. *Decision Making Theory. Tutorial*. Moscow: Mart, 2004, 656 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Аркадий Михайлович Михайленко, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
E-mail: am_plus@mail.ru

Данил Леонидович Шварц, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Обработка металлов давлением», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
ORCID: 0000-0002-5962-6230
E-mail: sdl190977@mail.ru

Arkadii M. Mikhailenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Metal Forming”, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
E-mail: am_plus@mail.ru

Danil L. Shvarts, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair “Metal Forming”, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
ORCID: 0000-0002-5962-6230
E-mail: sdl190977@mail.ru

Поступила в редакцию 19.07.2022
После доработки 21.10.2022
Принята к публикации 22.10.2022

Received 19.07.2022
Revised 21.10.2022
Accepted 22.10.2022



Оригинальная статья

УДК 669.16.22:621.793

DOI 10.17073/0368-0797-2022-11-778-785

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2431>

ВЛИЯНИЕ РАСХОДА И ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ВОЗДУШНОЙ ФУРМЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ С ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩЕЙ ВСТАВКОЙ В ДУТЬЕВОМ КАНАЛЕ

С. В. Албул¹, О. А. Кобелев^{1,2}, А. Г. Радюк¹,
А. Е. Титлянов¹, И. А. Левицкий¹

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

² Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения, ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» (Россия, 115088, Москва, Шарикоподшипниковская ул., 4)

Аннотация. Целью данной работы является анализ влияния теплоизолирующей вставки, а также расхода и температуры природного газа на процессы, происходящие в дутьевом канале воздушной фурмы доменной печи. В работе проанализированы полученные разными исследователями результаты промышленных и численных экспериментов по применению различных способов повышения полноты прохождения реакции горения в пределах воздушной фурмы подаваемого в нее природного газа (ПГ): увеличение расхода и температуры ПГ, использование теплоизолирующих вставок, установленных во внутренний стакан воздушной фурмы. С помощью программного комплекса Ansys Fluent исследовано влияние теплоизолирующей вставки и увеличения расхода ПГ на температуру и состав газов, выходящих из фурмы доменной печи № 5 ПАО «Северсталь». Установлено, что с увеличением расхода ПГ с 0,283 до 0,328 кг/с, температура газовой среды на выходе из фурмы уменьшается на 6 °С для варианта без вставки и увеличивается на 3 °С для варианта со вставкой. При исследовании влияния теплоизолирующей вставки и увеличения температуры ПГ (в разных сочетаниях) на процессы, происходящие в фурме, получено, что температура газовой среды на выходе из фурмы в случае применения теплоизолирующей вставки без подогрева ПГ несколько выше, чем при нагреве ПГ до 200 °С без вставки. Однако эффект подогрева ПГ при наличии вставки существенно выше, чем без нее, за счет взаимного усиления двух факторов воздействия на полноту горения ПГ в пределах фурмы, сопровождаемое защитой внутреннего стакана фурмы от прогара.

Ключевые слова: доменная печь, воздушная фурма, дутьевой канал, горячее дутье, расход природного газа, температура природного газа, теплоизолирующая вставка, горение природного газа, моделирование в Ansys

Для цитирования: Албул С.В., Кобелев О.А., Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Левицкий И.А. Влияние расхода и температуры природного газа на процессы, происходящие в воздушной фурме доменной печи с теплоизолирующей вставкой в дутьевом канале // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 11. С. 778–785. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-778-785>

Original article

EFFECT OF NATURAL GAS FLOW RATE AND TEMPERATURE ON THE PROCESSES OCCURRING IN A BLAST FURNACE TUYERE WITH HEAT-INSULATING INSERT IN BLAST CHANNEL

S. V. Albul¹, O. A. Kobelev^{1,2}, A. G. Radyuk¹,
A. E. Titlyanov¹, I. A. Levitskii¹

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

² JSC Russian State Research Center “ЦНИИТМАШ” (4 Sharikopodshipnikovskaya Str., Moscow 115088, Russian Federation)

Abstract. The purpose of this work was to analyze the effect of a heat-insulating insert, as well as the flow rate and temperature of natural gas on the processes occurring in blast channel of an air tuyere. The paper analyzes the results of industrial and numerical experiments obtained by different researchers on the use of various methods for increasing the completeness of combustion reaction within the air tuyere of natural gas (NG) fed into it: increase of NG flow rate; increase of NG temperature; the use of heat-insulating inserts installed in the inner glass of the air tuyere. Using the Ansys Fluent software complex, the effect of a heat-insulating insert and increase in NG flow rate on the temperature and composition of gases

leaving the tuyere of blast furnace no. 5 of PJSC Severstal was studied. It was found that with an increase in NG flow rate from 0.283 to 0.328 kg/s, the temperature of the gas medium at the tuyere outlet decreases by 6 °C for the variant without an insert and increases by 3 °C for the variant with it. When studying the effect of a heat-insulating insert and increase in NG temperature (in different combinations) on the processes occurring in a tuyere, it was found that temperature of the gaseous medium at the tuyere outlet in case of using a heat-insulating insert without NG heating is slightly higher than when NG is heated to 200 °C without inserts. However, the effect of NG heating in the presence of an insert is significantly higher than without it – there is mutual amplification of two factors influencing the completeness of NG combustion within the tuyere, accompanied by protection of the tuyere inner nozzle from burnout.

Keywords: blast furnace, air tuyere, blast channel, hot blast, natural gas flow rate, natural gas temperature, heat-insulating insert, natural gas combustion, Ansys simulation

For citation: Albul S.V., Kobelev O.A., Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Levitskii I.A. Effect of natural gas flow rate and temperature on the processes occurring in a blast furnace tuyere with heat-insulating insert in blast channel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 11, pp. 778–785. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-778-785>

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы активно ведутся работы по повышению стойкости оборудования металлургического производства и получаемых металлов путем выбора параметров обработки на основе математического планирования эксперимента и моделирования [1 – 3]. В этом ряду стоят работы и в области доменного производства [4]. Так, широко распространена практика экономии кокса в доменном процессе путем частичной его замены природным газом (ПГ), подаваемым в воздушную фурму. При этом желательно обеспечить большую полноту горения ПГ в дутьевом канале, поскольку в фурменной зоне имеет место предпочтительное развитие на поверхности кокса реакции $C + O_2$ по сравнению с реакцией $CH_4 + O_2$ [5]. Создание условий, способствующих воспламенению и горению ПГ внутри фурмы, с одной стороны, гарантирует внесение соответствующего количества теплоты в рабочее пространство доменной печи (т. е. возможность экономии кокса), а с другой стороны, увеличивает тепловую нагрузку на фурму, уменьшая срок ее службы, что неизбежно влечет за собой поиск решений этой проблемы. На сегодняшний день сложилась тенденция поиска комплексных решений, способствующих увеличению полноты горения ПГ в пределах фурмы и снижению тепловой нагрузки на фурму.

Одним из способов увеличения полноты реакции горения ПГ в фурме является повышение его расхода или температуры. В качестве компенсации негативных последствий горения ПГ в пределах воздушной фурмы может служить теплоизолирующая вставка в дутьевой канал фурмы [6 – 9]. Кроме того, изменения геометрии канала, обусловленные наличием вставки, также могут способствовать увеличению полноты прохождения реакции горения газа в пределах фурмы из-за его лучшего перемешивания с горячим дутьем.

Интенсификация горения ПГ в фурме вследствие увеличения его температуры из-за наличия теплоизолирующей вставки приводит к повышению температуры дутья на выходе из фурмы. Увеличение температуры дутья на каждые 4 °C позволяет увеличить подачу ПГ на 1 м³/т чугуна, а, следовательно, снизить количество кокса, необходимое для получения чугуна [10].

В зарубежной литературе широко освещены вопросы, связанные как с увеличением расхода ПГ [11 – 17], так и его температуры [14 – 20]. Из отечественных источников следует отметить способы подогрева ПГ до ввода его в фурму [21 – 24]. Это может быть осуществлено путем использования ПГ в качестве теплоносителя для охлаждения элементов фурменных приборов, причем подогрев ПГ в ряде случаев осуществляют ступенчато, последовательно пропуская его через охлаждаемые полости элементов фурменного прибора, что приводит к подогреву ПГ на 50 – 150 °C на каждой ступени [21].

Также подогретый ПГ смешивают с холодным. Полученную смесь вводят в поток горячего дутья воздушной фурмы. Температуру подаваемой смеси регулируют в интервале 10 – 500 °C посредством изменения расхода холодного ПГ в интервале 50 – 500 м³/ч [24].

Целью работы является анализ влияния наличия теплоизолирующей вставки, а также расхода и температуры ПГ на полноту прохождения реакции его горения в дутьевом канале воздушной фурмы путем изучения параметров дутья на выходе из фурмы.

ПАРАМЕТРЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В работе использована созданная в среде Ansys Fluent [25] математическая модель газодинамики и теплообмена в воздушной фурме доменной печи № 5 ПАО «Северсталь», оснащенной теплоизолирующей вставкой ($\lambda = 8,3$ Вт/(м·К)) во внутреннем стакане.

Модель включала в себя решение уравнений Навье–Стокса (RANS), неразрывности и k – ϵ модели турбулентности, уравнения энергии с учетом тепловых эффектов химических реакций, а также использование подмодели *finite rate/eddy dissipation* при учете взаимного влияния химических реакций и турбулентности в рамках модели *Species Transport*.

Численные эксперименты проведены для различных вариантов, отличающихся температурой и расходом ПГ, а также наличием теплоизолирующей вставки.

Варианты проведенных численных экспериментов перечислены в табл. 1.

Результаты расчета для разных вариантов представлены в табл. 2 и на рис. 1 – 3.

Особенности численных экспериментов

Table 1. Details of numerical experiments

Номер варианта	Параметр вставки	Параметр подачи природного газа
1	Вставка не предусмотрена	Расход – 0,283 кг/с; температура – 27 °С
2	Вставка не предусмотрена	Расход – 0,328 кг/с; температура – 27 °С
3	Вставка не предусмотрена	Расход – 0,283 кг/с; температура – 200 °С
4	Толщина 10 мм, установлена во внутренний стакан, выступает на 2 мм в дутьевой канал	Расход – 0,283 кг/с; температура – 27 °С
5	Толщина 10 мм, установлена во внутренний стакан, выступает на 2 мм в дутьевой канал	Расход – 0,328 кг/с; температура – 27 °С
6	Толщина 10 мм, установлена во внутренний стакан, выступает на 2 мм в дутьевой канал	Расход – 0,283 кг/с; температура – 200 °С

Результаты моделирования для различных вариантов

Table 2. Simulation results for various options

Показатель	Вариант расчета					
	1	2	3	4	5	6
Поток физической теплоты, вносимый в фурму природным газом, кВт	1,15	1,33	124,30	1,15	1,33	124,3
Поток физической теплоты, выходящий из дутьевого канала фурмы, кВт	-6372,9	-6478,9	-6989,7	-6911,8	-7068,0	-7850,5
Поток физической теплоты, выходящий из фурмы с водой системы охлаждения, кВт	-281,1	-286,0	-294,1	-175,4	-177,5	-183,7
Суммарная мощность, выделяющаяся при горении природного газа, кВт	678,9	789,6	1185,6	1112,6	1270,9	1936,5
Невязка теплового баланса фурмы, кВт	-0,781	-0,796	-0,756	-0,221	-0,208	-0,162
Средняя температура горячего дутья на выходе из фурмы, К	1377,7	1371,4	1448,1	1449,9	1453,2	1573,9
Средняя температура воды на выходе из фурмы, К	305,81	305,94	306,16	302,97	303,03	303,20
Средняя температура газовой среды в дутьевом канале фурмы, К	1399,5	1394,7	1413,1	1413,5	1409,1	1436,3
Средняя температура воды в водоохлаждаемой полости, К	305,7	305,8	306,0	302,9	302,9	303,0
Средняя температура рьяльной части, К	421,9	424,0	426,4	433,7	435,8	438,7
Средняя температура внутреннего стакана, К	507,2	511,4	515,2	356,8	357,5	358,8
Средняя температура вставки, К	–	–	–	1225,1	1236,6	1250,8
Массовая доля природного газа на выходе из дутьевого канала	0,0564	0,0644	0,0578	0,0564	0,0637	0,0554
Массовая доля кислорода на выходе из дутьевого канала	0,2928	0,2873	0,2792	0,2811	0,2748	0,2619
Массовая доля углекислого газа на выходе из дутьевого канала	0,0110	0,0128	0,0193	0,0184	0,0209	0,0308
Массовая доля воды на выходе из дутьевого канала	0,0090	0,0105	0,0158	0,0151	0,0171	0,0252
Средняя скорость природного газа на входе в фурму, м/с	100,4	115,6	156,7	98,5	112,8	152,1
Средняя скорость горячего дутья на выходе из фурмы, м/с	216,3	217,9	226,9	226,0	228,6	243,6

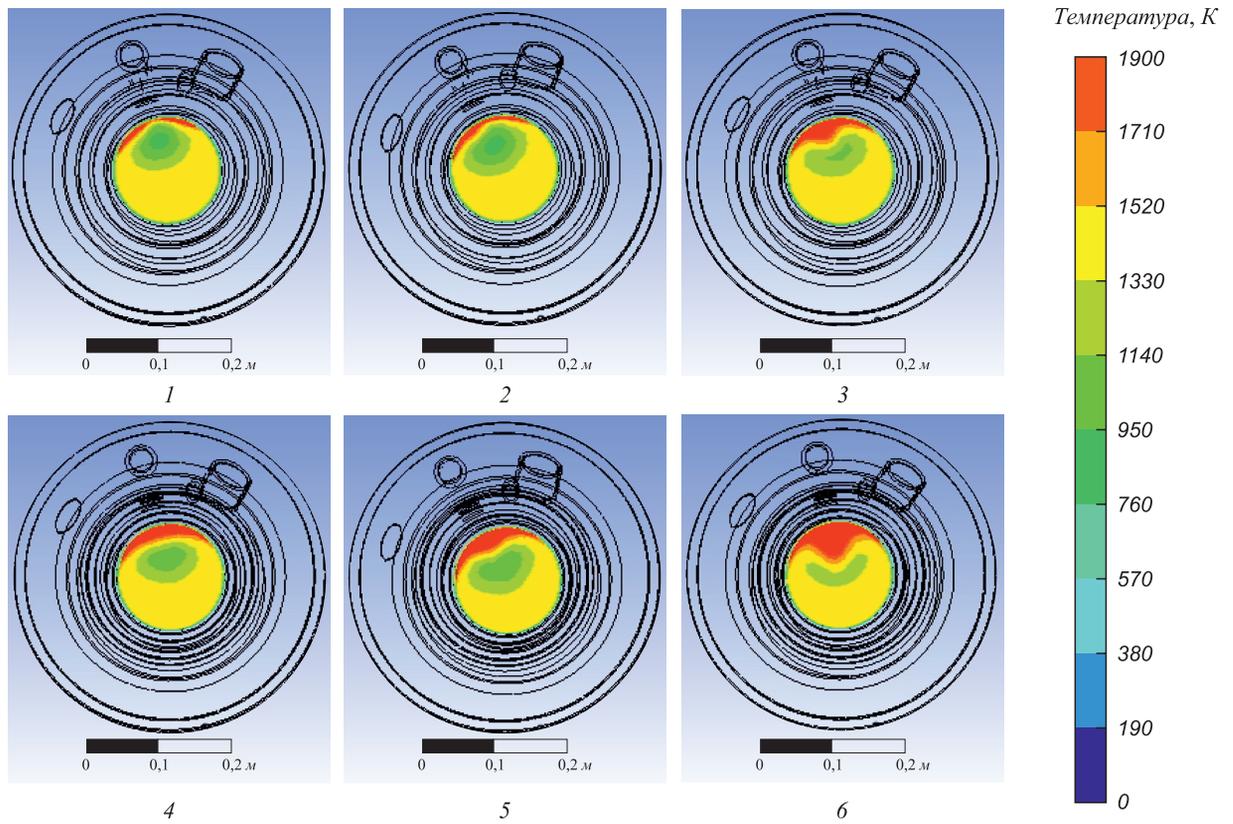


Рис. 1. Температурное поле газовой среды в выходном сечении фурмы (номера вариантов соответствуют табл. 1)

Fig. 1. Temperature field of gaseous medium in outlet section of the tuyere (variant numbers correspond to Table 1)

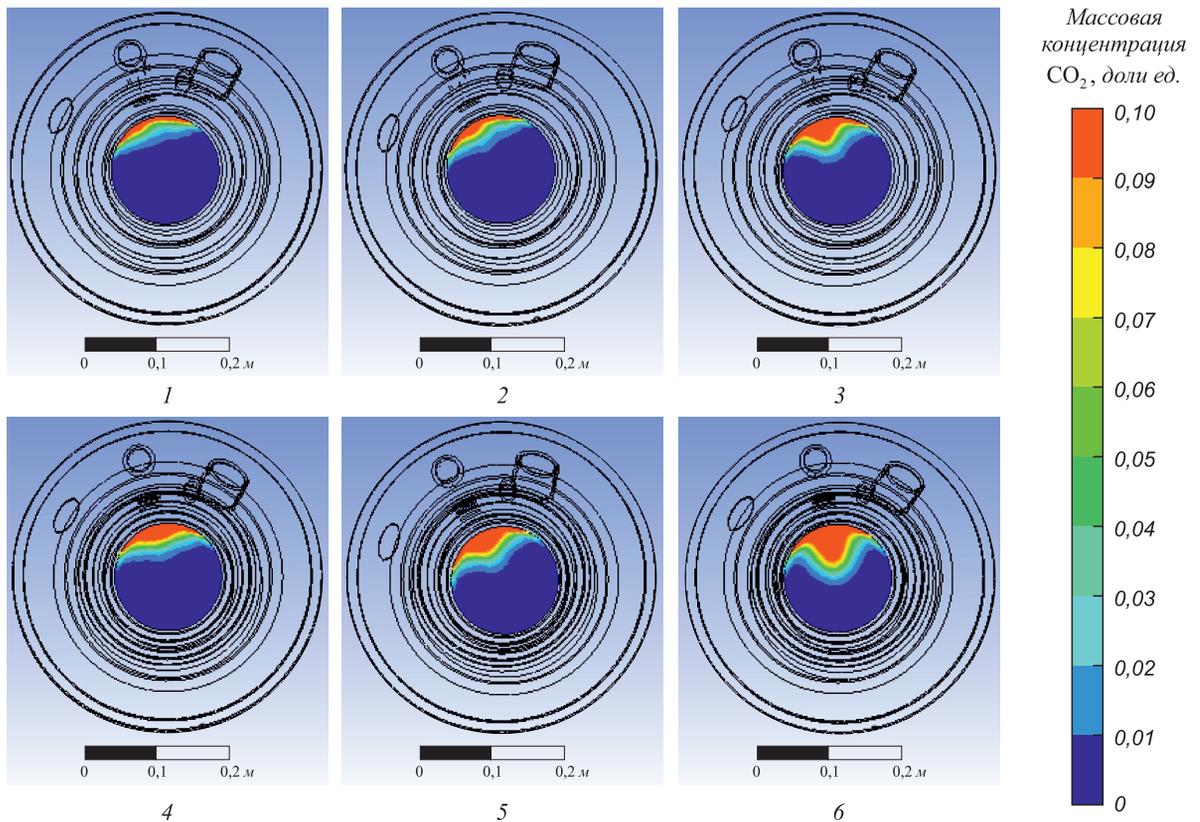


Рис. 2. Поле массовой концентрации CO₂ в выходном сечении фурмы (номера вариантов соответствуют табл. 1)

Fig. 2. Field of CO₂ mass concentration in outlet section of the tuyere (variant numbers correspond to Table 1)

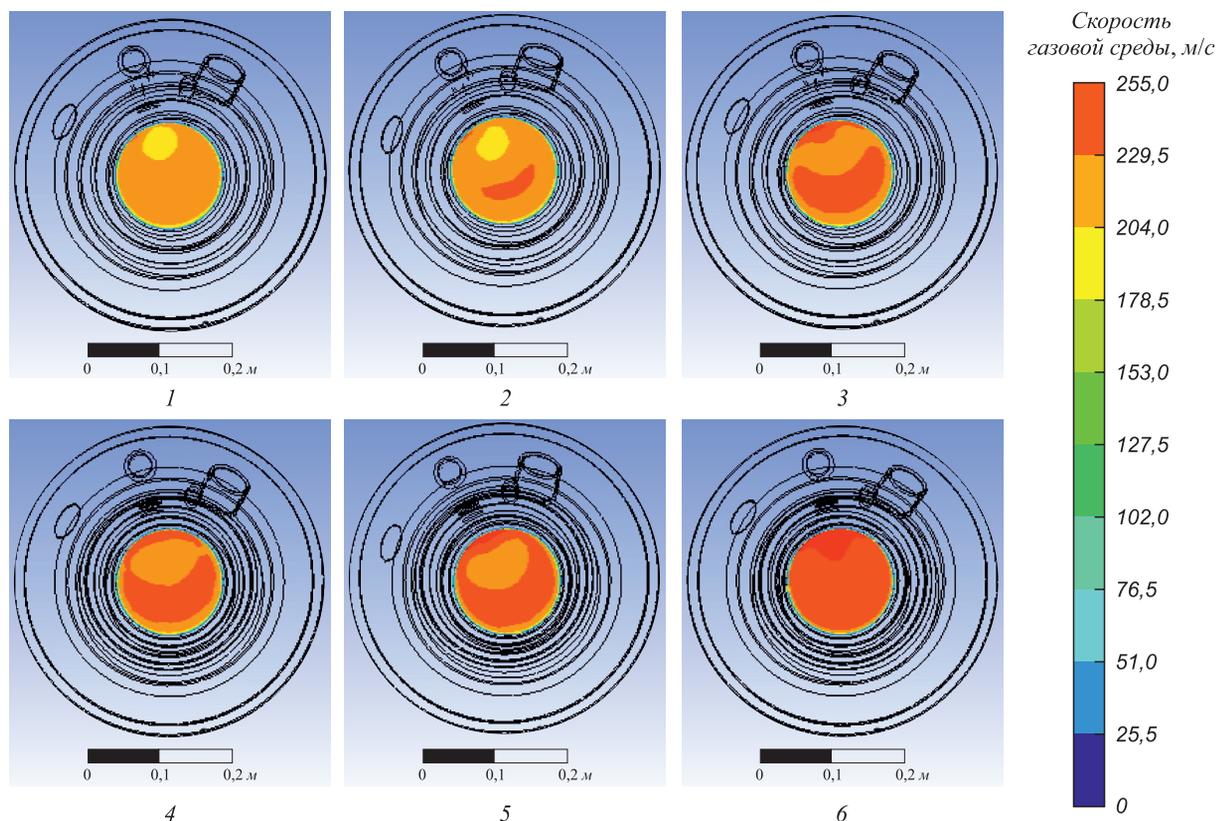


Рис. 3. Поле модуля скорости газовой среды в выходном сечении фурмы (номера вариантов соответствуют табл. 1)

Fig. 3. Field of the modulus of gaseous medium velocity in outlet section of the tuyere (variant numbers correspond to Table 1)

Показателем внутренней непротиворечивости полученных результатов может служить невязка теплового баланса фурмы, значения которой, как видно из табл. 2, существенно меньше значений статей теплового баланса фурмы. Что касается погрешности определяемых значений температуры, то, как показал метод повторного счета на измельченных расчетных сетках, они не превышают 0,1 °С.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как следует из данных, полученных для вариантов 1 и 4 (см. табл. 1, 2), в результате использования вставки в дутьевом канале температура дутья на выходе из фурмы увеличивается на 72 °С. Согласно рекомендациям [7, 8], удельный расход ПГ был увеличен на 18 м³/т чугуна. Для производительности печи 13 000 т/сут расход ПГ составил 130,6 м³/т чугуна или 0,328 кг/с на 1 фурму.

С увеличением расхода ПГ с 0,283 до 0,328 кг/с растет количество теплоты, выделившейся в результате реакции горения газа в дутьевом канале (варианты 2, 5). Однако при этом температура газов на выходе из фурмы уменьшается на 6 °С для варианта 2 (по сравнению с вариантом 1 без вставки) и увеличивается на 3 °С для варианта 5 (по сравнению с вариантом 4 со вставкой). Это объясняется тем, что при наличии встав-

ки количество теплоты, выделяющееся в результате реакции горения ПГ, а также прирост этой величины в результате увеличения расхода существенно выше, чем без вставки. Поэтому при наличии вставки эффект увеличения расхода холодного ПГ не только компенсируется, но и перекрывается (см. рис. 1). В свою очередь, увеличение полноты прохождения реакции горения приводит к увеличению температуры воды системы охлаждения фурмы, температуры рывльной части и внутреннего стакана (вставки) (см. табл. 2). Об увеличении полноты прохождения реакции горения свидетельствует также увеличение массовой доли продуктов реакции (см. табл. 2, рис. 2) и скорости дутья (см. табл. 2, рис. 3) на выходе из фурмы.

Таким образом, из расчетов видно, что увеличение расхода ПГ в фурме без теплоизолирующей вставки приводит к снижению температуры дутья, и, тем самым, теоретической температуры в фурменной зоне. Использование же вставки сопровождается увеличением температуры дутья, поэтому возможно дальнейшее увеличение расхода ПГ.

С увеличением температуры ПГ с 27 до 200 °С [5] увеличивается суммарное количество теплоты, выделившейся в результате реакции горения газа в дутьевом канале (см. табл. 2, варианты 1, 3), вследствие увеличения полноты прохождения реакции. Это приводит к увеличению температуры выходящих газов

(см. рис. 1) и воды системы охлаждения фурмы, температуры рывальной части и внутреннего стакана. Об увеличении полноты прохождения реакции свидетельствует также увеличение массовой доли ее продуктов на выходе из фурмы (см. рис. 2). Рост температуры дутья приводит к увеличению его скорости (см. рис. 3).

Установка в фурму теплоизолирующей вставки также способствует интенсификации газодинамических процессов (см. табл. 2, вариант 4), причем количественный эффект этого мероприятия несколько ниже, чем результат увеличения температуры ПГ без теплоизолирующей вставки (см. табл. 2, вариант 3, рис. 1–3). Однако температура газовой среды на выходе из фурмы в варианте 4 несколько выше, чем в варианте 3 (см. табл. 2).

Увеличение температуры ПГ, достигаемое при наличии теплоизолирующей вставки во внутреннем стакане фурмы, обеспечивает более выраженный эффект по сравнению с вариантом, когда вставка отсутствует (что видно из сравнения вариантов 3 и 6 с вариантами 1 и 4 соответственно, рис. 1–3).

Выводы

Проанализированы полученные разными исследователями результаты промышленных и численных

экспериментов по применению различных способов интенсификации процессов, происходящих в пределах воздушной фурмы с подаваемым в нее ПГ: увеличение расхода и температуры ПГ, применение теплоизолирующих вставок, установленных во внутренний стакан воздушной фурмы.

Численно исследовано влияние теплоизолирующей вставки и увеличения расхода ПГ на процесс горения ПГ в фурме доменной печи № 5 ПАО «Северсталь». Получено, что с увеличением расхода ПГ с 0,283 до 0,328 кг/с температура газовой среды на выходе из фурмы уменьшается на 6 °С для варианта без вставки и увеличивается на 3 °С для варианта со вставкой.

Численно исследовано влияние теплоизолирующей вставки и увеличения температуры ПГ (в разных сочетаниях) на процессы, происходящие в фурме. Получено, что температура газовой среды на выходе из фурмы в случае применения теплоизолирующей вставки без подогрева ПГ несколько выше, чем при нагреве ПГ до 200 °С без вставки. Однако влияние подогрева ПГ при наличии вставки существенно выше, чем без нее, за счет взаимного усиления двух факторов воздействия на полноту прохождения реакции горения ПГ в пределах фурмы, сопровождаемое защитой внутреннего стакана фурмы от прогара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- Nefedov A.V., Svichkar V.V., Chicheneva O.N. Re-engineering of equipment to feed the melting furnace with aluminum charge // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. P. 1198–1204. http://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_139
- Chichenev N.A., Chicheneva O.N., Karfidov A.O., Pashkov A.N. Selection of laser processing parameters for hot stamping tools based on mathematical planning of the experiment // *CIS Iron and Steel Review*. 2021. Vol. 22. P. 37–40. <https://doi.org/10.17580/cisisr.2021.02.07>
- Чиченева О.Н., Чиченев Н.А., Пашков А.Н., Горовая Т.Ю., Васильев М.В. Влияние электропластической деформации на сопротивление деформации тугоплавких металлов // *Металлург*. 2022. № 6. С. 43–47.
- Нефедов А.В., Новикова Ю.В., Чиченева О.Н. Манипулятор для подачи короба с жидким раствором для ремонта чугуновозных ковшей в доменном цехе АО «Уральская сталь» // *Черные металлы*. 2021. № 8. С. 4–9. <https://doi.org/10.17580/chm.2021.08.01>
- Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н., Юсфин Ю.С., Куронов И.Ф., Пареньков А.Е., Черноусов П.И. *Металлургия чугуна*. Москва: Академкнига, 2004. 774 с.
- Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Тарасов Ю.С., Сидорова Т.Ю. Снижение тепловых потерь на воздушных фурмах доменных печей путем теплоизоляции дутьевого канала // *Сталь*. 2019. № 4. С. 7–10.
- Радюк А.Г., Титлянов А.Е., Сидорова Т.Ю. Влияние шликерного покрытия на стойкость теплоизолирующей вставки в воздушной фурме доменной печи // *Металлург*. 2019. № 11. С. 21–25.
- Виноградов Е.Н., Радюк А.Г., Волков Е.А., Теребов А.Л., Сидорова Т.Ю. Снижение тепловых потерь через воздушную фурму доменной печи // *Сталь*. 2019. № 11. С. 9–12.
- Tarasov Y.S., Radyuk A.G., Gorbatyuk S.M. Simulation of heat losses and temperature of blast furnaces tuyeres // *MATEC Web of*
- Nefedov A.V., Svichkar V.V., Chicheneva O.N. Re-engineering of equipment to feed the melting furnace with aluminum charge. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021, pp. 1198–1204. http://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_139
- Chichenev N.A., Chicheneva O.N., Karfidov A.O., Pashkov A.N. Selection of laser processing parameters for hot stamping tools based on mathematical planning of the experiment. *CIS Iron and Steel Review*. 2021, vol. 22, pp. 37–40. <https://doi.org/10.17580/cisisr.2021.02.07>
- Chicheneva O.N., Chichenev N.A., Pashkov A.N., Gorovaya T.Yu., Vasiliev M.V. Influence of electroplastic deformation on the deformation resistance of refractory metals. *Metallurgist*. 2022, vol. 66, no. 5–6, pp. 657–662. <https://doi.org/10.1007/s11015-022-01373-4>
- Nefedov A.V., Novikova Yu.V., Chicheneva O.N. Manipulator for feeding a box with liquid solution for repair of cast iron buckets at blast furnace shop of JSC Ural Steel. *Chernye Metally*. 2021, vol. 2021, no. 8, pp. 4–9. <https://doi.org/10.17580/chm.2021.08.01>
- Vegman E.F., Zherebin B.N., Pokhvisnev A.N., Yusfin Yu.S., Kurunov I.F., Parenkov A.E., Chernousov P.I. *Iron Metallurgy*. M.: Akademkniga, 2004, 774 p. (In Russ.).
- Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Tarasov Yu.S., Sidorova T.Yu. Decreasing the heat losses at the air tuyeres in blast furnaces. *Steel in Translation*. 2019, vol. 49, no. 4, pp. 257–260. <https://doi.org/10.3103/S0967091219040119>
- Radyuk A.G., Titlyanov A.E., Sidorova T.Yu. Effect of slurry coating on the resistance of thermal insulation insert in blast furnace air tuyere. *Metallurgist*. 2020, vol. 63, no. 11–12, pp. 1153–1159. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-00935-8>
- Vinogradov E.N., Radyuk A.G., Volkov E.A., Terebov A.L., Sidorova T.Yu. Reducing heat losses through blast furnace tuyeres. *Steel in Translation*. 2019, vol. 49, no. 11, pp. 778–782. <https://doi.org/10.3103/S0967091219110160>
- Tarasov Yu.S., Radyuk A.G., Gorbatyuk S.M. Simulation of heat losses and temperature of blast furnaces tuyeres. *MATEC Web of*

- Conferences. 2017. Vol. 129. Article 06031.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201712906031>
10. Филатов С.В., Курунов И.Ф., Грачев С.Н. и др. Доменное производство НЛМК: традиции, инновации, развитие // Черная металлургия: Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2014. № 10. С. 30–34.
 11. Silaen A.K., Okosun T., Chen Y., Wu B., Zhao J., Zhao Y., D'Alessio J., Capo J.C., Zhou C.Q. Investigation of high-rate natural gas injection through various lance designs in a blast furnace // Iron and Steel Technology. 2016. Vol. 13. No. 3. P. 68–79.
 12. Silaen A.K., Okosun T., Chen Y., Wu B. Investigation of high rate natural gas injection through various lance designs in a blast furnace // AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings. 2015. Vol. 1. No. 3. P. 1536–1549.
 13. Okosun T., Street S.J., Chen Y., Zhao J., Wu B., Zhou C.Q. Investigation of co-injection of natural gas and pulverized coal in a blast furnace // AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings. 2015. Vol. 1. P. 1581–1594.
 14. Nielson S.E., Okosun T., D'Alessio J., Ray S., Klaas M., Zhou C.Q. Investigation of high-rate and pre-heated natural gas injection in the blast furnace // AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings. 2020. Vol. 1. P. 286–297.
<https://doi.org/10.33313/380/033>
 15. Okosun T., Nielson S., D'Alessio J., Klaas M., Street S.J., Zhou C.Q. Investigation of high-rate and pre-heated natural gas injection in the blast furnace // AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings. 2019. Vol. 2019 – May. P. 383–397.
<https://doi.org/10.33313/377/040>
 16. Okosun T., Liu X., Silaen A.K., Barker D., Dybzinski D.P., Zhou C.Q. Effects of blast furnace auxiliary fuel injection conditions and design parameters on combustion characteristics and injection lance wear // AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings. 2017. Vol. 1. P. 589–600.
 17. Pistorius P.C., Gibson J., Jampani M. Natural gas utilization in blast furnace ironmaking: Tuyère injection, shaft injection and prereduction // Applications of Process Engineering Principles in Materials Processing, Energy and Environmental Technologies. 2017. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham. P. 283–292.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-51091-0_26
 18. Фещенко С.А., Плешков В.И., Лизунов Б.Н., Лапшин А.А., Совеико К.Н., Логинов В.Н., Васильев Л.Е. Повышение эффективности доменной плавки с вдуванием природного газа за счет его подогрева // Металлург. 2007. № 11. С. 44–48.
<https://doi.org/10.1007/s11015-007-0110-5>
 19. Okosun T., Nielson S., D'Alessio J., Ray S., Street S., Zhou C. On the impacts of pre-heated natural gas injection in blast furnaces // Processes. 2020. Vol. 8. No. 7. Article 771.
<https://doi.org/10.3390/pr8070771>
 20. Feshchenko S.A., Pleshkov V.I., Loginov V.N., Kurunov I.F. Synergetic effect of natural gas pre-heating prior to its injection into a blast furnace // Proceedings of the AISTech 2008, Pittsburgh, PA, USA, 5–8 May 2008. P. 6.
 21. Патент 2294377 РФ, C21B5/00. Способ подачи природного газа в доменную печь / В.И. Плешков, С.А. Фещенко, И.Н. Шишук и др.; заявлено 03.10.05; опубликовано 27.02.07; Бюллетень № 6.
 22. Патент 2359042 РФ, C21B7/16. Устройство для подачи природного газа в доменную печь / Г.И. Урбанович, Е.Г. Урбанович, В.Ф. Воропаев и др.; заявлено 20.11.07; опубликовано 20.06.09; Бюллетень № 17.
 23. Патент 2460806 РФ, C21B7/16. Дутьевая фурма доменной печи / Л.А. Зайнуллин, Р.Л. Зайнуллин, А.В. Бычков и др.; заявлено 03.05.11; опубликовано 10.09.12; Бюллетень № 25.
 24. Патент 2514234 РФ, C21B5/00. Способ подачи природного газа в доменную печь / В.А. Авраменко, А.В. Чевычелов, В.А. Бегинюк и др.; заявлено 17.09.12; опубликовано 27.04.14; Бюллетень № 17.
- Conferences. 2017, vol. 129, article 06031.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201712906031>
10. Filatov S.V., Kurunov I.F., Grachev S.N., etc. Blast furnace production at NLMK: Traditions, innovations, development. *Ferrous Metallurgy: Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information*. 2014, no. 10, pp. 30–34. (In Russ.).
 11. Silaen A.K., Okosun T., Chen Y., Wu B., Zhao J., Zhao Y., D'Alessio J., Capo J.C., Zhou C.Q. Investigation of high-rate natural gas injection through various lance designs in a blast furnace. *Iron and Steel Technology*. 2016, vol. 13, no. 3, pp. 68–79.
 12. Silaen A.K., Okosun T., Chen Y., Wu B. Investigation of high rate natural gas injection through various lance designs in a blast furnace. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2015, vol. 1, no. 3, pp. 1536–1549.
 13. Okosun T., Street S.J., Chen Y., Zhao J., Wu B., Zhou C.Q. Investigation of co-injection of natural gas and pulverized coal in a blast furnace. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2015, vol. 1, pp. 1581–1594.
 14. Nielson S.E., Okosun T., D'Alessio J., Ray S., Klaas M., Zhou C.Q. Investigation of high-rate and pre-heated natural gas injection in the blast furnace. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2020, vol. 1, pp. 286–297.
<https://doi.org/10.33313/380/033>
 15. Okosun T., Nielson S., D'Alessio J., Klaas M., Street S.J., Zhou C.Q. Investigation of high-rate and pre-heated natural gas injection in the blast furnace. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2019, vol. 2019 – May, pp. 383–397.
<https://doi.org/10.33313/377/040>
 16. Okosun T., Liu X., Silaen A.K., Barker D., Dybzinski D.P., Zhou C.Q. Effects of blast furnace auxiliary fuel injection conditions and design parameters on combustion characteristics and injection lance wear. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*. 2017, vol. 1, pp. 589–600.
 17. Pistorius P.C., Gibson J., Jampani M. Natural gas utilization in blast furnace ironmaking: Tuyère injection, shaft injection and prereduction. *Applications of Process Engineering Principles in Materials Processing, Energy and Environmental Technologies*. 2017, *The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham, pp. 283–292.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-51091-0_26
 18. Feshchenko S.A., Pleshkov V.I., Lizunov B.N., Lapshin A.A., Soveiko K.N., Loginov V.N., Vasil'ev L.E. Making blast-furnace smelting more efficient through the injection of heated natural gas. *Metallurgist*, 2007, vol. 51, no. 11–12, pp. 605–611.
<https://doi.org/10.1007/s11015-007-0110-5>
 19. Okosun T., Nielson S., D'Alessio J., Ray S., Street S., Zhou C. On the impacts of pre-heated natural gas injection in blast furnaces. *Processes*. 2020, vol. 8, no. 7, article 771.
<https://doi.org/10.3390/pr8070771>
 20. Feshchenko S.A., Pleshkov V.I., Loginov V.N., Kurunov I.F. Synergetic effect of natural gas pre-heating prior to its injection into a blast furnace. In: *Proceedings of the AISTech 2008, Pittsburgh, PA, USA, 5–8 May 2008*. P. 6.
 21. Pleshkov V.I., Feshchenko S.A., Shishuk I.N. etc. *The method of supplying natural gas to a blast furnace*. Patent RF no. 2294377. MPK S21V5/00. *Bulleten' izobretenii*. 2007, no. 6. (In Russ.)
 22. Urbanovich G.I., Urbanovich E.G., Voropaev V.F. etc. *Device for supplying natural gas to a blast furnace*. Patent RF no. 2359042. MPK C21B7/16. *Bulleten' izobretenii*. 2009, no. 17. (In Russ.)
 23. Zainullin L.A., Zainullin R.L., Bychkov A.V. etc. *Blast tuyere of a blast furnace*. Patent RF no. 2460806. MPK C21B7/16. *Bulleten' izobretenii*. 2012, no. 25. (In Russ.)
 24. Avramenko V.A., Chevychelov A.V., Beginyuk V.A. etc. *Method for supplying natural gas to a blast furnace*. Patent RF no. 2514234. MPK C21B5/00. *Bulleten' izobretenii*. 2014, no. 17. (In Russ.)

25. Горбатюк С.М., Тарасов Ю.С., Левицкий И.А., Радюк А.Г., Титлянов А.Е. Влияние керамической вставки с завихрителем на газодинамику и теплообмен в воздушной фурме доменной печи // Известия вузов. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 5. С. 337–344. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-5-337-344>
25. Gorbatyuk S.M., Tarasov Yu.S., Levitskii I.A., Radyuk A.G., Titlyanov A.E. Influence of a ceramic insert with a swirl on the gas dynamics and heat exchange in the air tuyere of a blast furnace. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 5, pp. 337–344. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-5-337-344>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Валерьевич Албул, старший преподаватель кафедры «Инжиниринг технологического оборудования», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
ORCID: 0000-0003-1802-7378
E-mail: albul@misis.ru

Sergei V. Albul, Senior Lecturer of the Chair “Engineering of Technological Equipment”, National University of Science and Technology “MISIS”
ORCID: 0000-0003-1802-7378
E-mail: albul@misis.ru

Олег Анатольевич Кобелев, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», главный специалист ГК «РОСАТОМ», Центральный научно-исследовательский институт технологии машиностроения, ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»
E-mail: oakobelev@cniitmash.com

Oleg A. Kobelev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., National University of Science and Technology “MISIS”, Chief Specialist of State Corporation “ROSATOM”, JSC Russian State Research Center “CNIITMASH”
E-mail: oakobelev@cniitmash.com

Александр Германович Радюк, д.т.н., профессор, ведущий научный сотрудник кафедры обработки металлов давлением, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
ORCID: 0000-0001-6758-9911
E-mail: radjuk@rambler.ru

Aleksandr G. Radyuk, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Leading Researcher of the Chair “Metal Forming”, National University of Science and Technology “MISIS”
ORCID: 0000-0001-6758-9911
E-mail: radjuk@rambler.ru

Александр Евграфович Титлянов, к.т.н., старший научный сотрудник кафедры обработки металлов давлением, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
E-mail: radjuk@rambler.ru

Aleksandr E. Titlyanov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Chair “Metal Forming”, National University of Science and Technology “MISIS”
E-mail: radjuk@rambler.ru

Игорь Анисимович Левицкий, к.т.н., доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
ORCID: 0000-0002-9345-3628
E-mail: lewwwis@mail.ru

Igor’ A. Levitskii, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”
ORCID: 0000-0002-9345-3628
E-mail: lewwwis@mail.ru

Вклад авторов

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

С. В. Албул – проведение расчетов и моделирования, анализ результатов исследований, подготовка текста.
О. А. Кобелев – научное руководство, формирование выводов.
А. Г. Радюк – постановка целей и задач исследования, анализ исследования, подготовка текста.
А. Е. Титлянов – постановка целей и задач исследования, научное консультирование.
И. А. Левицкий – формирование концепции, научное руководство.

S. V. Albul – conducting the calculations and modeling, analysis of the research results, preparation of the text.
O. A. Kobelev – scientific guidance, formation of the conclusions.
A. G. Radyuk – setting the research goals and objectives, analysis of the research results, preparation of the text.
A. E. Titlyanov – setting the research goals and objectives, scientific consulting.
I. A. Levitskii – formation of the concept, scientific guidance.

Поступила в редакцию 01.05.2022
 После доработки 20.10.2022
 Принята к публикации 22.10.2022

Received 01.05.2022
 Revised 20.10.2022
 Accepted 22.10.2022



Оригинальная статья

УДК 621.77.016.2

DOI 10.17073/0368-0797-2022-11-786-797

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2432>

РАЗРАБОТКА ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ СПЛАВА Co – 28Cr – 6Mo НА ОСНОВЕ КАРТ ПЛАСТИЧНОСТИ

Ю. В. Гамин¹, А. В. Коротицкий¹, Т. Ю. Кин¹,
С. П. Галкин¹, С. А. Костин², Е. О. Тихомиров¹

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

² АО «Завод Качественных Сплавов» (Россия, 115516, Москва, Покровка, 33)

Аннотация. Проведены испытания сплава медицинского назначения Co–28Cr–6Mo после гомогенизации на одноосное сжатие при температурах 1000, 1100 и 1200 °С и скоростях деформации 1, 10 и 50 с⁻¹ с использованием установки Gleeble System 3800. Получены кривые сопротивления деформации, описывающие деформационное поведение сплава. С использованием трех моделей (степенной, экспоненциальной и функции гиперболического синуса), описывающих напряжение течения, выполнены расчеты параметров горячей деформации (энергия активации, параметр Зенера-Холломона). Наиболее высокую степень сходимости показали результаты расчета, проведенного на основе степенной функции и функции гиперболического синуса. Данные модели могут быть использованы для точных расчетов напряжения течения при заданных параметрах температуры и скорости деформации, или для моделирования процесса деформации. Также на основе карт пластичности выполнена разработка деформационно-скоростных режимов горячей деформации сплава Co–28Cr–6Mo, что позволит в дальнейшем выбрать оптимальные режимы прокатки. Согласно полученным данным, благоприятные температурно-скоростные условия для осуществления горячей деформации смещаются по мере накопления деформации в область высоких температур и малых скоростей деформации. При этом крайне неблагоприятная зона с отрицательными значениями критерия стабильности пластического течения ξ , появляющаяся при значениях показателя деформации $e = 0,3 - 0,4$, продолжает довольно существенно расти с увеличением деформационного воздействия. Горячую деформацию сплава Co–28Cr–6Mo при малых степенях обжатия ($e < 0,2$) целесообразнее выполнять при температурах более 1150 °С и скоростях деформации не менее 20 с⁻¹. С ростом степени деформации необходимо выбирать более низкие скорости деформации (1 – 5 с⁻¹) и более высокую температуру деформации.

Ключевые слова: сплав Co–Cr–Mo, пластическая деформация, реологические свойства, параметр Зенера-Холломона, карты пластичности, режим деформации, скорость деформации

Для цитирования: Гамин Ю.В., Коротицкий А.В., Кин Т.Ю., Галкин С.П., Костин С.А., Тихомиров Е.О. Разработка температурно-скоростных режимов горячей деформации сплава Co – 28Cr – 6Mo на основе карт пластичности // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 11. С. 786–797. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-786-797>

Original article

DEVELOPMENT OF TEMPERATURE-SPEED MODES OF HOT DEFORMATION OF Co – 28Cr – 6Mo ALLOY BASED ON PROCESSING MAPS

Yu. V. Gamin¹, A. V. Korotitskii¹, T. Yu. Kin¹,
S. P. Galkin¹, S. A. Kostin², E. O. Tikhomirov¹

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

² JSC “Plant of Quality Alloys” (33 Pokrovka Str., Moscow 115516, Russian Federation)

Abstract. In the article, the tests of the medical alloy Co–28Cr–6Mo after homogenization for uniaxial compression at temperatures of 1000, 1100 and 1200 °C and strain rates of 1, 10, and 50 s⁻¹ were carried out using the Gleeble System 3800. The stress-strain curves describing the alloy deformation behavior were obtained. The calculations of hot deformation parameters (activation energy, Zener-Hollomon parameter) were performed using three models (power-law, exponential, and hyperbolic sine function) describing the flow stress. The highest degree of convergence was shown by the calculation results based on the power function and the hyperbolic sine function. These models can be used to accurately calculate the flow stress at given temperature and strain rate parameters, or to simulate the deformation process. Also, based on processing maps, the authors developed the deformation-speed modes of hot deformation of the Co–28Cr–6Mo alloy. It will make it possible to choose the optimal rolling modes in the future. According to the data obtained, favorable temperature-speed conditions for hot deformation are shifted as deformation accumulates

to the region of high temperatures and low strain rates. At the same time, the extremely unfavorable zone with negative values of the ξ -criterion, which appears at $e = 0.3 - 0.4$, continues to grow quite significantly with an increase in the deformation effect. Hot deformation of the Co–28Cr–6Mo alloy at low compression ratios ($e < 0.2$) is more expedient to perform at temperatures above 1150 °C and strain rates of at least 20 s⁻¹. With an increase in deformation degree, it is necessary to choose lower strain rates (1–5 s⁻¹) and higher deformation temperature.

Keywords: Co – Cr – Mo alloy, plastic deformation, rheological properties, Zener-Hollomon parameter, processing maps, deformation mode, strain rate

For citation: Gamin Yu.V., Korotitskii A.V., Kin T.Yu., Galkin S.P., Kostin S.A., Tikhomirov E.O. Development of temperature-speed modes of hot deformation of Co – 28Cr – 6Mo alloy based on processing maps. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 11, pp. 786–797. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-786-797>

ВВЕДЕНИЕ

Сплав Co–Cr–Mo является деформируемым высокотемпературным сплавом, который широко применяется в медицине для изготовления имплантов тазобедренного, коленного или локтевого суставов [1–4]. Он обладает высокими механическими свойствами [5], износостойкостью, коррозионной стойкостью [6, 7] и биологической совместимостью [8]. Чаще всего производственный процесс сплава Co–Cr–Mo включает операции горячей, теплой и холоднойковки [9, 10] или сортовой прокатки [11] для получения прутков требуемого диаметра. Далее термообработку, штамповку или механическую обработку. Качество металлических материалов определяется всеми этапами производства, начиная от выплавки, где необходимо обеспечение заданных параметров атмосферы, чистоты исходных материалов и др. [12–14], и заканчивая финишной обработкой. Вместе с тем, горячая деформация является основной операцией, оказывающей влияние на получение бездефектной конечной продукции требуемых свойств и микроструктуры. Известно [15–19], что сплав Co–Cr–Mo содержит высокое содержание легирующих элементов в виде выделяющихся карбидов и интерметаллидных фаз, и имеет различный фазовый состав при различных температурах. В связи с этим, данный сплав обладает достаточно узким температурным интервалом деформации, и при неблагоприятных режимах деформации возможно образование трещин и дефектов в процессе деформации. Поэтому изучение температурно-деформационного поведения сплава в процессе горячей деформации является важной задачей.

Во время высокотемпературной деформационной обработки в сплавах могут происходить микроструктурные изменения по различным механизмам. Механизмы пластической деформации, при которых происходит разупрочнение (динамическая рекристаллизация или динамический возврат), считаются «безопасными» или «стабильными», а другие могут приводить к образованию дефектов [20, 21]. Диаграммы обработки (или карты пластичности), построенные на основе динамической модели материала, показывают способность сплава к горячей деформации и позволяют установить наиболее благоприятные режимы обработки [22–24].

Основной целью данной работы являются изучение деформационного поведения и разработка деформационно-скоростных режимов горячей деформации

сплава Co–28Cr–6Mo, что позволит в дальнейшем выбрать оптимальные режимы прокатки.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились для медицинского сплава Co–28Cr–6Mo, химический состав которого представлен ниже, % (по массе):

	Co	Cr	Mo	Ni	Fe	Si	C	S
основа	28	6	0,7	0,5	0,3	0,013	0,004	

Исходный слиток получен вакуумно-индукционной выплавкой, после чего его подвергали гомогенизационному отжигу при температуре 1230 °C в течение 6 ч с последующей закалкой в воде. Далее из исходного слитка вырезали цилиндрические образцы диаметром 10 мм высотой 15 мм, которые испытывали на одноосное сжатие на испытательной установке Gleeble 3800. Деформацию проводили в вакууме при температурах 1000, 1100 и 1200 °C и скоростях деформации 1, 10 и 50 с⁻¹. Каждый образец нагревали до температуры на 20 °C выше температуры предстоящей деформации со скоростью 10 °C/с и выдерживали при данной температуре 60 с. Далее образец охлаждали до температуры деформации со скоростью 2 °C/с и выдерживали при температуре испытаний 180 с до начала сжатия.

Контролируемый нагрев и поддержание температуры образца в ходе всего испытания осуществлялись регулируемым пропусканием электрического тока непосредственно через образец. Такой способ нагрева обеспечивает высокую скорость и хорошую однородность распределения температуры по глубине образца (и относительно неплохую вдоль образца) как при изотермической выдержке, так и при нагреве. Контроль за температурой осуществляли с помощью приваренных непосредственно к центральной части образца термопар. Значение подаваемой мощности электрического тока контролировалось автоматически при помощи обратной связи с применением встроенного ПИД-регулятора, обеспечивающего нагрев и охлаждение с заданной скоростью, а также стабильное поддержание (не более $\pm 0,5$ °C) температуры в ходе изотермической выдержки.

Для предотвращения «прикипания» образца к поверхности бойков в ходе испытаний большой продолжительности при высоких температурах, а также с целью нейтрализации химического взаимодействия

образца с графитом и различными смазками, торцевые контактные поверхности образца покрывали фольгой из тантала. Для уменьшения контактных сил трения между торцевыми поверхностями образца и деформирующими рабочими поверхностями бойков, изготовленных из карбида вольфрама, использовали графитовую фольгу.

Образцы деформировались в горячем состоянии с показателем деформации $e = 0,75$ в условиях поддержания постоянной истинной скорости деформации образца при заданной температуре. Степень пластической деформации задавали и оценивали по степени обжатия (осадки) образца в логарифмических координатах:

$$e_i = \ln \left(1 - \frac{\Delta h}{h_0} \right). \quad (1)$$

Истинное значение напряжения (сопротивление) материала $\sigma_{ист}$ по мере накопления пластической деформации оценивали по отношению мгновенного значения усилия со стороны деформирующей штанги (оснастки) $F_{мгн}$ к мгновенному значению сечения образца S_0 :

$$\sigma_{ист} = \frac{F_{мгн}}{S_0} \left(1 - \frac{\Delta h}{h_0} \right). \quad (2)$$

Сразу после окончания процесса сжатия образец немедленно охлаждали до комнатной температуры смесью газов N_2 (давление 6 МПа) и He (4 МПа) при скорости охлаждения примерно $50 \text{ }^\circ\text{C/s}$.

Данные по напряжениям и деформациям переведены в истинные координаты (рис. 1), в которые предварительно были внесены дополнительные корректирующие поправки, связанные с учетом конечной жесткости испытательной машины и используемой оснастки, а также фактора трения при осадке. Помимо этого, были учтены отклонения фактической скорости осадки от заданной и естественный температурный разогрев, вследствие которого возникает занижение значений сопротивления деформации по сравнению с гипотетическим экзотермическим процессом.

Корректирующие поправки на температурные и скоростные условия экстраполяционно вносились с учетом экспериментально установленных зависимостей для коэффициента скоростной чувствительности (m) и коэффициента температурного разупрочнения (K_t), определенных для каждой степени накопленной деформации по форме экспериментальных температурно-скоростных зависимостей сопротивления деформации.

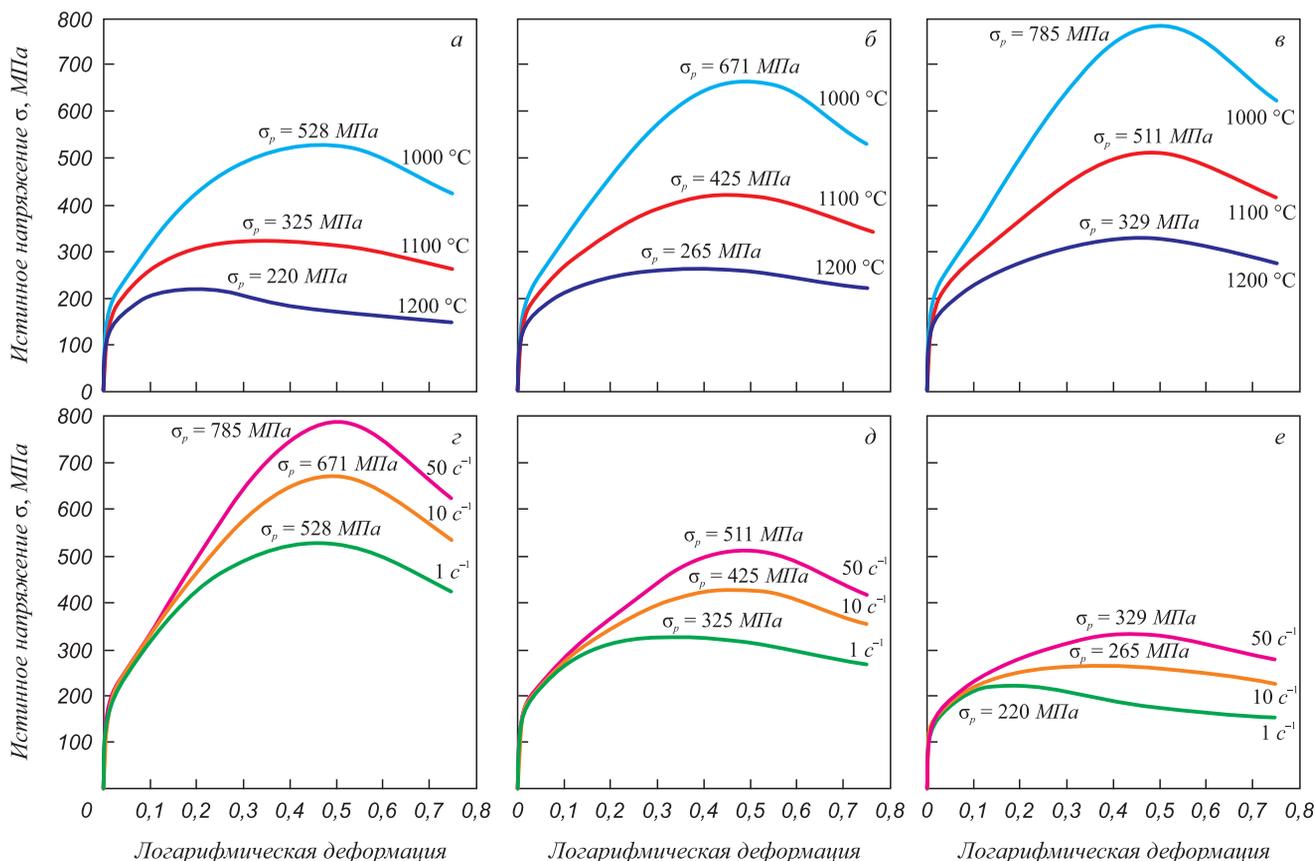


Рис. 1. Кривые сопротивления деформации сплава Co – 28Cr – 6Mo при разных температурах и скоростях деформации: 1 (а), 10 (б) и 50 с⁻¹ (в), а также с увеличением скорости деформации при изотермических условиях: 1000 (з), 1100 (д) и 1200 °C (е)

Fig. 1. Stress-strain curves of Co – 28Cr – 6Mo alloy at different temperatures and strain rates: 1 (a), 10 (b) and 50 s⁻¹ (v), as well as with an increase in the strain rate at isothermal conditions: 1000 (z), 1100 (d) and 1200 °C (e)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кривые сопротивления деформации

На рис. 1 представлены типичные кривые в координатах истинное напряжение – логарифмическая деформация после горячей деформации на осевое сжатие образцов. Как видно, сплав Co–28Cr–6Mo обладает высоким сопротивлением деформации при температурах 1000 – 1200 °С. На кривых можно наблюдать типичную зависимость снижения напряжения течения при повышении температуры и при уменьшении скорости деформации. При этом, в сравнении с температурной (рис. 1, а – в), скоростная чувствительность сплава менее значительна и снижается с ростом температуры (рис. 1, з – е). Так, например, для $T = 1000$ °С, при увеличении скорости деформации с 1 до 10 с⁻¹, максимальное напряжение σ_p возрастает на 20 %, а для скоростей деформации 10 и 50 с⁻¹ увеличение максимального напряжения происходит только на 8 %.

В начале процесса деформации образцов (до достижения пикового напряжения) происходит интенсивный рост сопротивления деформации, т. е. упрочнение материала, и можно наблюдать два характерных участка. До величины деформации $e \approx 0,02$ напряжение течения практически одинаково увеличивается для всех температур и скоростей деформации. Далее, в зависимости от температуры и скорости деформации, кривые имеют разный угол наклона линий на графиках. Для $\dot{\epsilon} = 1$ с⁻¹ напряжение возрастает более плавно и при $T = 1200$ °С практически сразу выходит на установившуюся стадию, когда напряжение почти не меняется с ростом величины деформации. С увеличением скорости деформации и снижением температуры упрочнение становится более интенсивным и для $\dot{\epsilon} = 50$ с⁻¹ имеет практически линейную зависимость (рис. 1, в).

Пиковые напряжения при различных температурах и скоростях деформации

Peak stresses at different temperatures and strain rates

Температура, °С	Скорость деформации, с ⁻¹	Пиковое напряжение σ_p , МПа
1000	1	528
	10	671
	50	785
1100	1	325
	10	425
	50	511
1200	1	220
	10	265
	50	329

Для самой низкой скорости деформации 1 с⁻¹ (рис. 1, а) максимальное напряжение σ_p зафиксировано при разной величине деформации e_p . При снижении температуры испытаний с 1200 до 1000 °С e_p увеличивается с 0,22 до 0,48, что говорит о более высоком деформационном упрочнении в процессе сжатия на данном участке. Для скоростей деформации 10 и 50 с⁻¹ максимальное пиковое напряжение достигается при величине деформации в диапазоне 0,4 – 0,5 для всех температур испытаний. После достижения пикового напряжения сопротивление деформации начинает снижаться до окончания сжатия, что говорит о развитии процессов разупрочнения.

Определение параметров горячей деформации

Влияние температуры и скорости деформации на деформационное поведение металлических материалов описывается параметром Зенера-Холломона, называемым температурно-скомпенсированной скоростью деформации:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = AF(\sigma), \tag{3}$$

где $\dot{\epsilon}$ – скорость деформации, с⁻¹; T – абсолютная температура деформации, К; R – газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль·К); Q – энергия активации процесса, контролирующего горячую деформацию, кДж/моль.

Функция $F(\sigma)$ может быть определена тремя математическими выражениями:

$$F(\sigma) = \sigma^{n'} \text{ для } \alpha\sigma < 0,8; \tag{4}$$

$$F(\sigma) = \exp(\beta\sigma) \text{ для } \alpha\sigma > 1,2; \tag{5}$$

$$F(\sigma) = [\sinh(\alpha\sigma)]^n \text{ для всех } \sigma, \tag{6}$$

где A , β , n , n' – константы исследуемого материала, подлежащие определению из данных экспериментов; $\alpha = \beta/n'$.

Для построения модели пластического течения необходимо нахождение энергии активации Q , входящей в параметр Зенера-Холломона (3), и установление связи между параметром Z и пиковыми напряжениями деформирования σ_p . Используя экспериментальные кривые сопротивления деформации (см. рис. 1), определены пиковые напряжения для каждой температуры и скорости деформации (см. таблицу).

Далее с помощью регрессионного анализа и построения зависимостей $\ln(\dot{\epsilon}) - \ln(\sigma)$, $\ln(\dot{\epsilon}) - \sigma$ и $\ln(\dot{\epsilon}) - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ можно определить коэффициенты n' , β , n . В данном случае полученные по графикам значения для каждой модели (4) – (6) составили $n = 5,943$; $n' = 9,381$; $\beta = 0,0238$. Отсюда коэффициент $\alpha = \beta/n' = 0,00254$.

Для определения энергии активации Q по трем рассматриваемым моделям необходимо построить зави-

симости $n \ln(\sigma) - \ln(\dot{\epsilon})$, $\beta \sigma - \ln(\dot{\epsilon})$ и $n \ln[\sin h(\alpha \sigma)] - \ln(\dot{\epsilon})$ от $1/T$. Среднее значение угла наклона полученных графиков будет определять значение энергии активации Q , а точка пересечения с осью ординат – значение $\ln(A)$. В соответствии с описанными выше расчетами получены следующие значения энергии активации: 651 ± 27 , 727 ± 106 и 581 ± 48 кДж/моль для трех рассмотренных моделей соответственно.

На основе полученных значений Q производился расчет значений Z и $\ln(Z)$ для каждой температуры и скорости деформации. После этого, используя найденные параметры, рассчитывались ожидаемые значения для напряжения течения σ , соответствующие степенной функции, экспоненциальной и функции гиперболического синуса. С целью проверки сходимости результатов выполненных расчетов авторы строили линии тренда в координатах расчетного напряжения течения и полученного экспериментально (рис. 2). Для рассматриваемого сплава наиболее высокую степень сходимости показали результаты расчета, проведенные на основе степенной функции ($R^2 = 0,9976$) и функции гиперболического синуса ($R^2 = 0,9937$). В соответствии с этим, усредненное значение в оценке энергии активации, с учетом этих двух (наиболее точных) моделей, составило 616 ± 65 кДж/моль. Данное значение является достаточно высоким и сопоставимо с другими подобными сплавами [25, 26], что говорит о высоком сопротивлении деформации и значительном упрочнении даже при высоких температурах деформации.

Карты пластичности

Карта пластичности была предложена Прасадам [27] на основе теории динамической модели материала (ДММ), которая направлена на изучение технологичности материалов при горячей деформации. В теории ДММ общая энергия P , производимая во время горячей деформации, может быть разделена на энергию диссипации G , потребляемую при пластической деформации, и энергию диссипации J , потребляемую при эволюции микроструктуры во время деформации. Оба компонента могут быть представлены скоростью деформации и напряжением течения, что выражается как [28]

$$P = \sigma \dot{\epsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma. \quad (7)$$

Методика построения карт пластической деформации для определения оптимальных условий проведения термометаллургической обработки сводится к построению зависимости способности материала рассеивать энергию деформации (η -критерий) и зависимости стабильности пластического течения (ξ -критерий) от температуры, скорости и степени пластической деформации. В результате графического анализа полученных

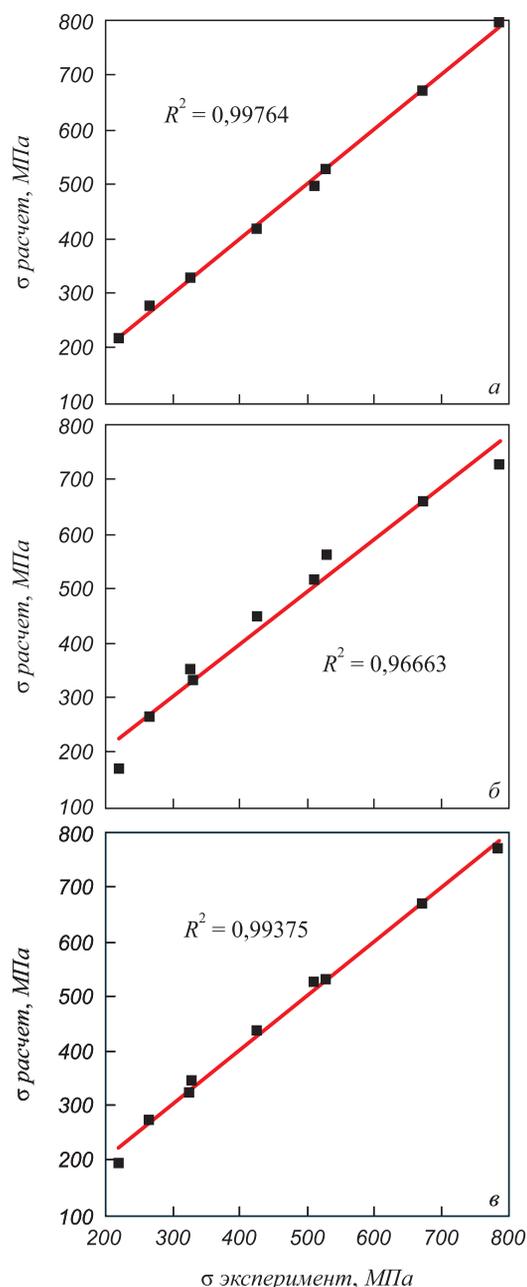


Рис. 2. Сравнение расчетных значений сопротивления деформации с экспериментальными для степенной функции (а), экспоненциальной функции (б) и функции гиперболического синуса (в)

Fig. 2. Comparison of calculated values of resistance to deformation with experimental ones for power function (a), an exponential function (b) and hyperbolic sine function (c)

зависимостей появляется возможность выбора оптимальных условий пластической деформации.

В качестве исходных данных для построения карт пластической деформации используются результаты сжатия цилиндрических образцов металлических материалов. В исходные экспериментальные диаграммы деформации должны быть внесены корректирующие поправки, связанные с учетом конечной жесткости испытательной машины и используемой оснастки. Напряжения течения должны быть скорректированы на

изменение температуры в процессе деформации, а также на неизбежный при такого рода испытаниях фактор трения при осадке.

Учет сил трения, возникающих между бойками и образцом, проводили по известной формуле для осадки цилиндрических образцов [29]:

$$\sigma = \frac{\sigma_T}{1 + \frac{2}{2\sqrt{3}} f \frac{r_0}{h_0} \exp\left(\frac{3\varepsilon}{2}\right)}, \quad (8)$$

где σ_T – значение напряжения течения до учета поправки на трение, МПа; ε – истинная степень деформации; f – коэффициент трения между торцами образца и бойками; r_0, h_0 – начальные радиус и высота образца, мм.

Учет изменения температуры можно произвести по формуле

$$\sigma_T = \sigma e^{\frac{Q'}{R} \left(\frac{1}{T_D} - \frac{1}{T_R} \right)}, \quad (9)$$

где σ – значение напряжения, полученное при испытании, МПа; Q' – постоянный коэффициент, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T_D – заданная температура деформации, К; T_R – реальная температура, измеряемая термопарой, К.

Значение коэффициента Q' можно определить по зависимости напряжения течения от температуры при определенной промежуточной степени накопленной деформации при условии, если характер кривых течения аналогичен для всех примененных температур и скоростей. Однако, такой способ учета не совсем

корректен ввиду того, что процесс разогрева при термомеханическом воздействии, реализуемом при данной схеме, трудно назвать адиабатическим. Имеет место существенный контактный теплообмен с бойками деформирующей системы. В этом случае корректнее осуществлять температурную корректировку диаграмм деформации за счет построения трехмерных плоскостей, отражающих мгновенное значение напряжения течения в зависимости от текущего значения температуры и реального значения скорости деформационного воздействия, если оно существенно отличалось от директивно заданного.

Для каждого уровня наведенной логарифмической пластической деформации можно сформировать свою 3D-плоскость, характеризующую распределение механического сопротивления в зависимости от фактической температуры и логарифма фактической скорости деформирования (рис. 3, а).

Для определения функциональной зависимости, выраженной общим уравнением для описания искривленной плоскости, производили аппроксимацию (находя минимум квадратов отклонений), вычисляя коэффициенты уравнения, аналитически описывающего данную плоскость. Приемлемость решения (степень качества аппроксимации) оценивали по степени «невязки» расчетных значений относительно экспериментальных и величине взвешенного коэффициента корреляции.

Далее сделана корректировка на фактический температурный разогрев, а также внесена поправка на скоростное отклонение от заданного (директивного)

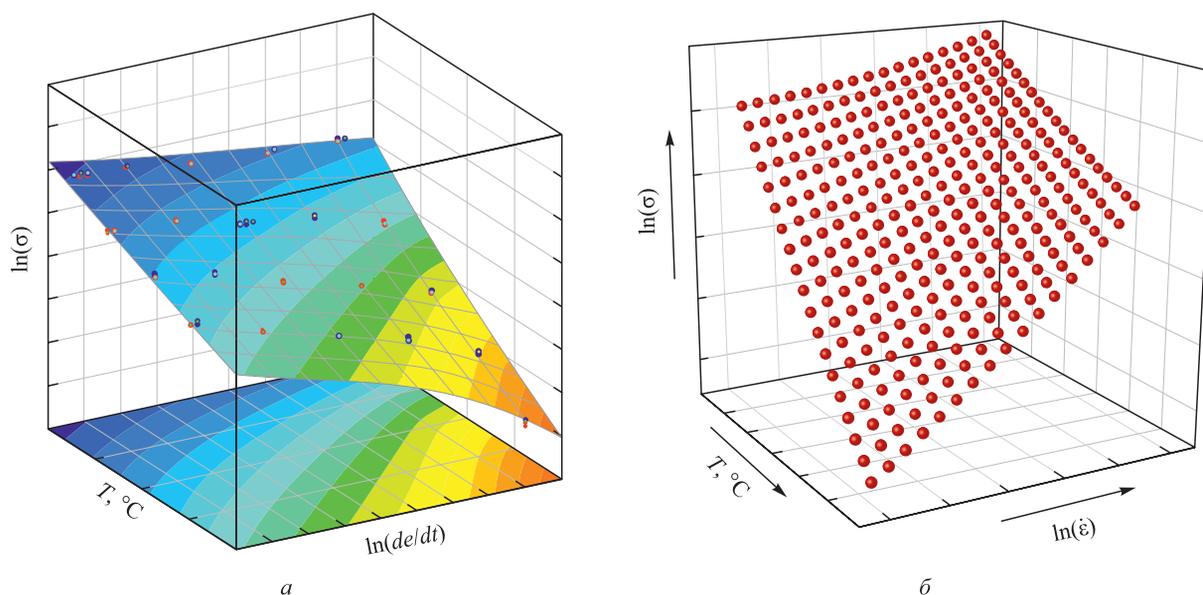


Рис. 3. Температурно-скоростная зависимость сопротивления деформации к моменту накопления выбранного значения логарифмической деформации (первичная 3D-плоскость распределения и ее проекция) (а); изменение сопротивления деформации в зависимости от T и $\ln(\dot{\varepsilon})$ при фиксированном значении ε (б)

Fig. 3. Temperature-speed dependence of resistance to deformation (a) by the moment of accumulation of the logarithmic deformation selected value (primary 3D distribution plane and its projection); (b) change in resistance to deformation as a function of T and $\ln(\dot{\varepsilon})$ at a fixed value of ε

значения. В результате интерполяции сформирована матрица значений искомой функции для разных температур и скоростей деформации во всем рассматриваемом диапазоне (рис. 3, б).

В ходе дальнейшего анализа полученных «изодеформационных срезов» можно определить частные производные в каждой точке и установить тем самым характер изменения коэффициента скоростной чувствительности m , определяемый из соотношения

$$m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}}. \quad (10)$$

В дальнейшем это позволяет определить значение способности материала рассеивать энергию деформации (η -критерий), осуществляя интерполяцию и формируя матрицу значений η -критерия для разных температур и скоростей деформации, используя формулу

$$\eta = \frac{2m}{m+1}. \quad (11)$$

Далее, по сгенерированной карте распределения способности материала рассеивать энергию деформации, вычисляем значение критерия стабильности пластического течения для данного изодеформационного среза. Для этого определяем производную логарифма отношения $\frac{2m}{m+1}$ по логарифму скорости деформации и находим значение критерия стабильности пластического течения при разных температурах и скоростях деформации:

$$\xi = \frac{\partial \ln \frac{2m}{m+1}}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m. \quad (12)$$

В результате интерполяции получаем матрицу значений ξ -критерия для разных температур и скоростей деформации.

Для выбора оптимальных условий деформации металлических материалов необходимо совместить построенные зависимости способности материала рассеивать энергию деформации и стабильности пластического течения от температуры и логарифма скорости деформации на одной диаграмме.

Оптимальными условиями пластической деформации будут участки в зоне с $\xi > 0$ и максимальными значениями критерия способности материала рассеивать энергию деформации.

Диаграмму зависимости стабильности пластического течения от температуры и логарифма скорости деформации есть смысл рассматривать, разбив ее на две зоны: участок с $\xi < 0$ и участок с $\xi > 0$. Или же рассматривать в качестве благоприятных те участки, где достигаются максимальные значения ξ -критерия и η -критерия.

Анализ диаграмм деформаций, проведенный по описанной выше методике, дал возможность проследить за изменением значений коэффициента скоростной чувствительности m , способности материала рассеивать энергию деформации η , а также за изменением критерия стабильности пластического течения ξ в зависимости от температуры и скорости деформационного воздействия при разных степенях накопленной деформации (рис. 4).

Из рис. 5 видно, что благоприятные температурно-скоростные условия для осуществления горячей деформации (т. е. те участки, где достигаются максимальные значения ξ -критерия и η -критерия) смещаются по мере накопления деформации в область высоких температур и малых скоростей деформации. При этом крайне неблагоприятная зона с отрицательными значениями ξ -критерия, появляющаяся при $e = 0,3 - 0,4$, продолжает довольно существенно расти с увеличением деформационного воздействия. В целом, общий уровень ξ -критерия и η -критерия, заметно снизившийся при деформациях выше 0,2, на всем оставшемся диапазоне воздействия сохраняется на невысоком уровне. В то же время, при малых деформациях ($e < 0,2$) среднее значение для критерия стабильности пластического течения ξ не сильно отличается от наименьшего (во всем рассматриваемом спектре скоростей и температур).

Таким образом, горячую деформацию сплава Co–28Cr–6Mo при малых степенях обжатия ($e < 0,2$) (или коэффициентах вытяжки) целесообразнее выполнять при более высоких температурах (более 1150 °С) и скоростях деформации $\dot{\epsilon}$ не менее 20 с⁻¹. С ростом степени деформации или коэффициента вытяжки необходимо выбирать более низкие скорости деформации от 1 до 5 с⁻¹ и температуру деформации 1150 – 1200 °С.

Выводы

Исследованы реологические свойства сплава Co–28Cr–6Mo медицинского назначения.

По результатам проведенных экспериментов на одноосное сжатие образцов получены кривые сопротивления деформации. На основе полученных данных проведен расчет параметров горячей деформации и параметра Зенера-Холломона, а также определена энергия активации для сплава Co–28Cr–6Mo, равная 616 ± 65 кДж/моль.

Для рассматриваемого сплава наиболее высокую степень сходимости показали результаты расчета, проведенные на основе степенной функции ($R^2 = 0,9976$) и функции гиперболического синуса ($R^2 = 0,9937$). Полученные данные могут быть использованы для расчета напряжения течения или моделирования пластической деформации различными способами ОМД.

По экспериментальным данным рассчитаны и построены карты пластичности сплава в зависимости от температуры и скорости деформации при разных сте-

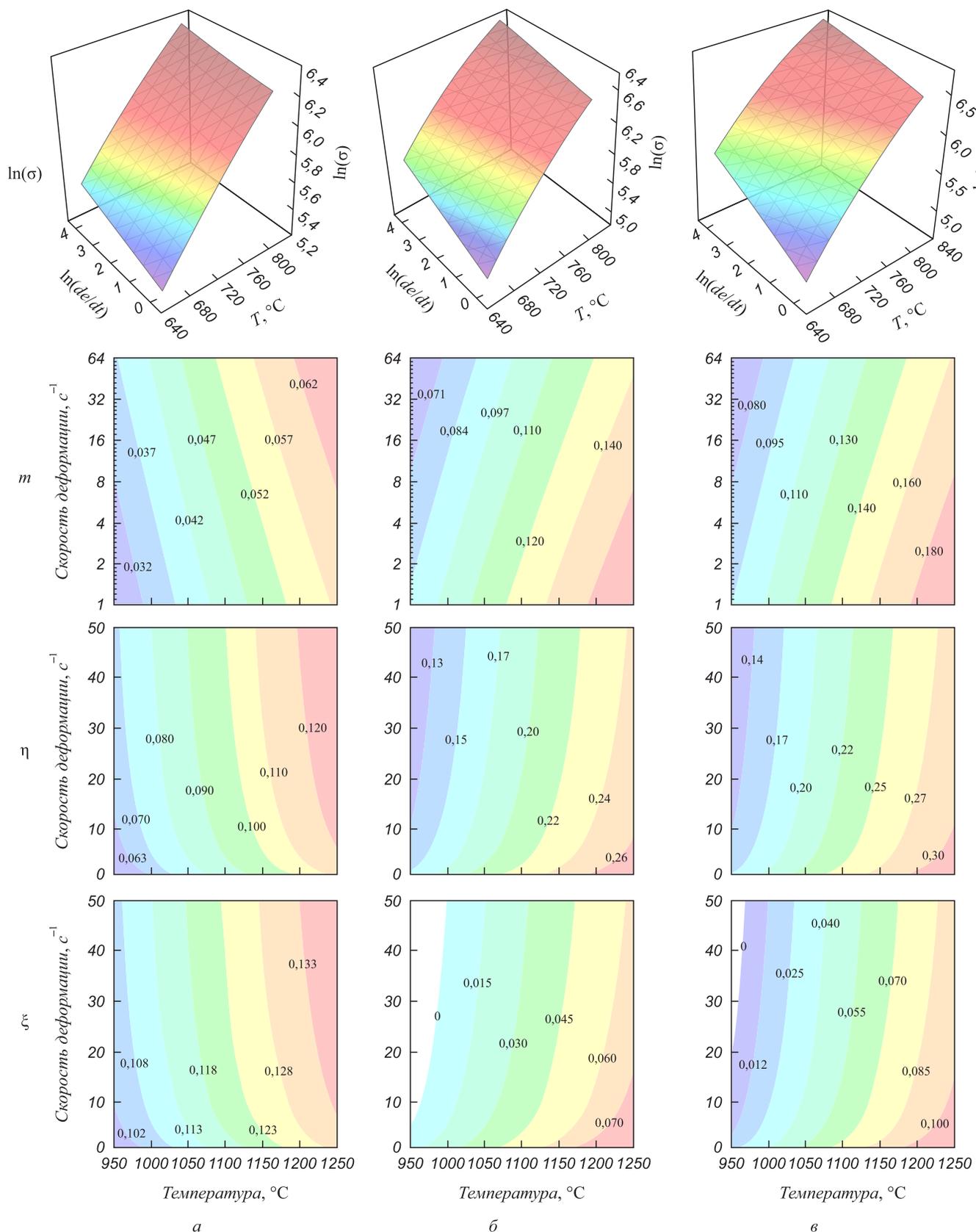


Рис. 4. Диаграммы сопротивления деформации $\ln(\sigma)$, коэффициента скоростной чувствительности m , значений η и ξ в зависимости от температуры и скорости деформации при различных значениях пластической деформации ϵ :
 а – 0,2; б – 0,4; в – 0,6

Fig. 4. Diagrams of resistance to deformation $\ln(\sigma)$, coefficient of strain sensitivity m , values of η and ξ depending on temperature and strain rate at different value of plastic deformation ϵ :
 а – 0.2; б – 0.4; в – 0.6

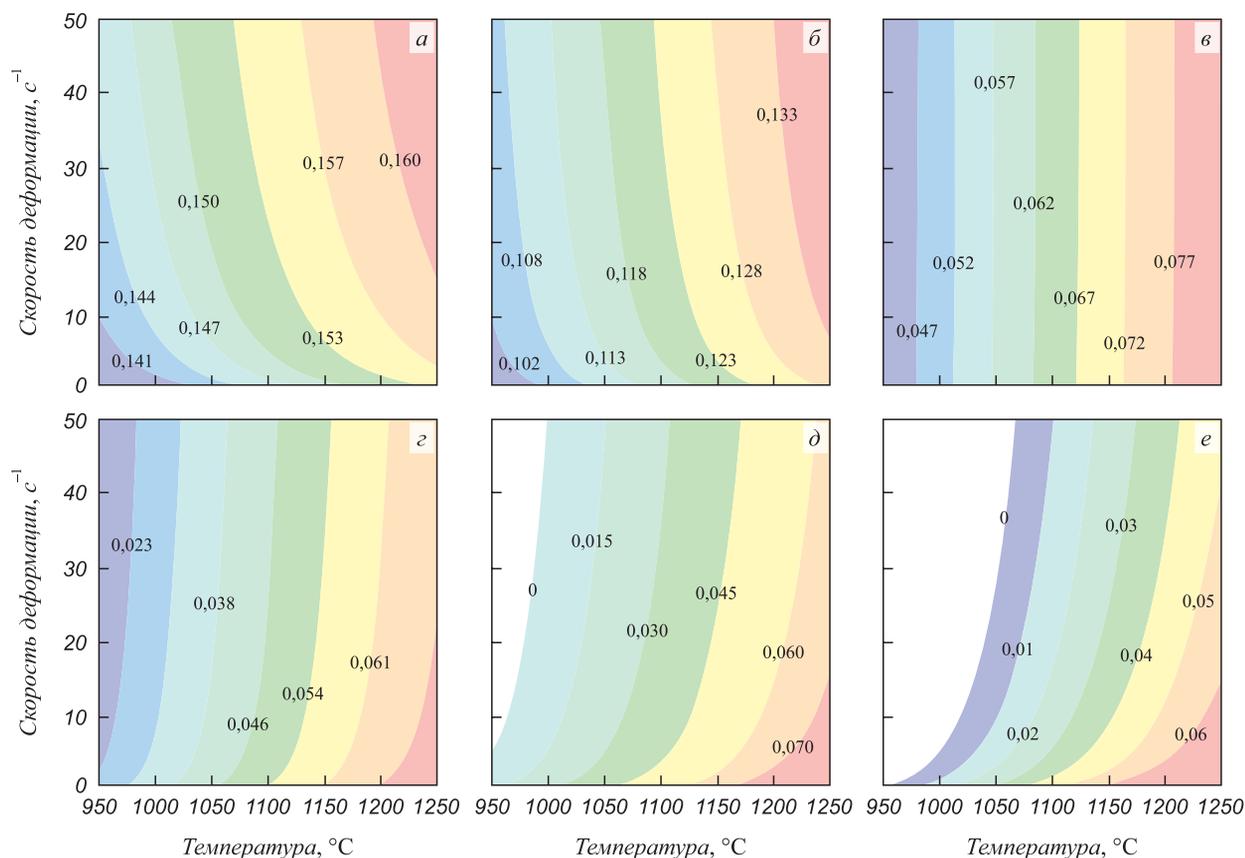


Рис. 5. Изменение температурно-скоростной зависимости критерия стабильности пластического течения ξ по мере накопления пластической деформации: а – 0,15; б – 0,20; в – 0,25; г – 0,30; д – 0,40; е – 0,75

Fig. 5. Change in temperature-speed dependence of the criterion of plastic flow stability ξ with accumulation of plastic deformation: а – 0.15; б – 0.20; в – 0.25; г – 0.30; д – 0.40; е – 0.75

пенях накопленной деформации. Далее они могут быть использованы для определения оптимальных условий проведения термомеханической обработки и разработки технологических режимов горячей деформации.

Установлено, что горячую деформацию сплава Co–28Cr–6Mo при малых степенях обжатия ($e < 0,2$)

(или коэффициентах вытяжки) целесообразнее выполнять при более высоких температурах (более 1150 °C) и скоростях деформации $\dot{\epsilon}$ не менее 20 с⁻¹. С ростом степени деформации или коэффициента вытяжки необходимо выбирать более низкие скорости деформации от 1 до 5 с⁻¹ и температуру деформации 1150 – 1200 °C.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Dobbs H.S., Robertson J.L.M. Heat treatment of cast Co-Cr-Mo for orthopedic implant use // *Journal of Materials Science*. 1983. Vol. 18. P. 391–401. <https://doi.org/10.1007/BF00560627>
2. Niinomi M., Nakai M., Hieda J. Development of new metallic alloys for biomedical applications // *Acta Biomaterialia*. 2012. Vol. 8. No. 11. P. 3888–3903. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2012.06.037>
3. Moradi S.M., Zangeneh S., Vardak S., Bahrami R. New Co-Cr-Mo-Nb-Cu alloy for implant applications: Properties characterization // *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. Vol. 925. Article 166387. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166387>
4. Mahmoud Z. Ibrahim, Ahmed A.D. Sarhan, Farazila Yusuf, Hamdi M. Biomedical materials and techniques to improve the tribological, mechanical and biomedical properties of orthopedic implants – A review article // *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 714. P. 636–667. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.04.231>
5. Henriques B., Gasik M., Souza J.C.M., Nascimento R.M., Soares D., Silva F.S. Mechanical and thermal properties of hot pressed CoCrMo–porcelain composites developed for prosthetic dentistry //

1. Dobbs H.S., Robertson J.L.M. Heat treatment of cast Co-Cr-Mo for orthopedic implant use. *Journal of Materials Science*. 1983, vol. 18, pp. 391–401. <https://doi.org/10.1007/BF00560627>
2. Niinomi M., Nakai M., Hieda J. Development of new metallic alloys for biomedical applications. *Acta Biomaterialia*. 2012, vol. 8, no. 11, pp. 3888–3903. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2012.06.037>
3. Moradi S.M., Zangeneh S., Vardak S., Bahrami R. New Co-Cr-Mo-Nb-Cu alloy for implant applications: Properties characterization. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022, vol. 925, article 166387. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166387>
4. Mahmoud Z. Ibrahim, Ahmed A.D. Sarhan, Farazila Yusuf, Hamdi M. Biomedical materials and techniques to improve the tribological, mechanical and biomedical properties of orthopedic implants – A review article. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017, vol. 714, pp. 636–667. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.04.231>
5. Henriques B., Gasik M., Souza J.C.M., Nascimento R.M., Soares D., Silva F.S. Mechanical and thermal properties of hot pressed CoCrMo–porcelain composites developed for prosthetic dentistry. *Jour-*

- Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2014. Vol. 30. P. 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2013.10.023>
6. Vidal C.V., Muñoz A.I. Effect of thermal treatment and applied potential on the electrochemical behaviour of CoCrMo biomedical alloy // *Electrochimica Acta*. 2009. Vol. 54. No. 6. P. 1798–1809. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.10.018>
 7. Vidal C.V., Muñoz A.I. Electrochemical characterisation of biomedical alloys for surgical implants in simulated body fluids // *Corrosion Science*. 2008. Vol. 50. No. 7. P. 1954–1961. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.04.002>
 8. Zhang E., Liu C. A new antibacterial Co-Cr-Mo-Cu alloy: Preparation, biocorrosion, mechanical and antibacterial property // *Materials Science and Engineering: C*. 2016. Vol. 69. P. 134–143. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.05.028>
 9. Yamanaka K., Mori M., Chiba A. Mechanical properties of as-forged Ni-free Co–29Cr–6Mo alloys with ultrafine-grained microstructure // *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 528. No. 18. P. 5961–5966. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.04.027>
 10. Yamanaka K., Mori M., Yoshida K., Kuramoto K., Chiba A. Manufacturing of high-strength Ni-free Co–Cr–Mo alloy rods via cold swaging // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2016. Vol. 60. P. 38–47. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.12.032>
 11. Yamanaka K., Mori M., Yoshida K., Balvay S., Hartmann D., Fabre D., Chiba A. Preparation of high-strength Co–Cr–Mo alloy rods via hot-caliber rolling // *Materialia*. 2020. Vol. 12. Article 100729. <https://doi.org/10.1016/j.mta.2020.100729>
 12. Makeev D.B., Kozlova O.N., Polulyakh L.A., Petelin A.L., Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya. Involvement of the Domestic Manganese Ores in Production // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020. Vol. 2020. No. 9. P. 938–941. <https://doi.org/10.1134/S0036029520090098>
 13. Dashevskii V.Ya., Makeev D.B., Polulyakh L.A., Aleksandrov A.A., Leont'ev L.I. Dephosphorization of manganese-containing oxide melts // *Doklady Physical Chemistry*. 2017. Vol. 473. P. 55–57. <https://doi.org/10.1134/S0012501617040017>
 14. Полулях Л.А., Дашевский В.Я., Травянов А.Я., Юсфин Ю.С., Петелин А.Л. Поведение фосфора в доменной печи при выплавке чугунов и доменного ферромарганца // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2009. Т. 52. № 3. С. 3–5.
 15. Liao Y., Pourzal R., Stemmer P., Wimmer M.A., Jacobs J.J., Fischer A., Marks L.D. New insights into hard phases of CoCrMo metal-on-metal hip replacements // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2012. Vol. 12. P. 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2012.03.013>
 16. Caudillo M., Herrera-Trejo M., Castro M.R., Ramírez E., González C.R., Juárez J.I. On carbide dissolution in an as-cast ASTM F-75 alloy // *Journal of Biomedical Materials Research*. 2002. Vol. 59. No. 2. P. 378–385. <https://doi.org/10.1002/jbm.10001>
 17. Kaiser R., Williamson K., O'Brien C., Ramirez-Garcia S., Browne D.J. The influence of cooling conditions on grain size, secondary phase precipitates and mechanical properties of biomedical alloy specimens produced by investment casting // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2013. Vol. 24. P. 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2013.04.013>
 18. Yamanaka K., Mori M., Chiba A. Assessment of precipitation behavior in dental castings of a Co–Cr–Mo alloy // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2015. Vol. 50. P. 268–276. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.06.020>
 19. Rosenthal R., Cardoso B.R., Bott I.S., Paranhos R.P.R., Carvalho E.A. Phase characterization in as-cast F-75 Co–Cr–Mo–C alloy // *Journal of Materials Science*. 2010. Vol. 45. P. 4021–4028. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4480-x>
 20. Chiba A., Lee S.-H., Matsumoto H., Nakamura M. Construction of processing map for biomedical Co–28Cr–6Mo–0.16N alloy by studying its hot deformation behavior using compression tests // *Materials Science and Engineering: A*. 2009. Vol. 513–514. P. 286–293. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.02.044>
 6. Vidal C.V., Muñoz A.I. Effect of thermal treatment and applied potential on the electrochemical behaviour of CoCrMo biomedical alloy. *Electrochimica Acta*. 2009, vol. 54, no. 6, pp. 1798–1809. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.10.018>
 7. Vidal C.V., Muñoz A.I. Electrochemical characterisation of biomedical alloys for surgical implants in simulated body fluids. *Corrosion Science*. 2008, vol. 50, no. 7, pp. 1954–1961. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.04.002>
 8. Zhang E., Liu C. A new antibacterial Co-Cr-Mo-Cu alloy: Preparation, biocorrosion, mechanical and antibacterial property. *Materials Science and Engineering: C*. 2016, vol. 69, pp. 134–143. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.05.028>
 9. Yamanaka K., Mori M., Chiba A. Mechanical properties of as-forged Ni-free Co–29Cr–6Mo alloys with ultrafine-grained microstructure. *Materials Science and Engineering: A*. 2011, vol. 528, no. 18, pp. 5961–5966. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.04.027>
 10. Yamanaka K., Mori M., Yoshida K., Kuramoto K., Chiba A. Manufacturing of high-strength Ni-free Co–Cr–Mo alloy rods via cold swaging. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2016, vol. 60, pp. 38–47. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.12.032>
 11. Yamanaka K., Mori M., Yoshida K., Balvay S., Hartmann D., Fabre D., Chiba A. Preparation of high-strength Co–Cr–Mo alloy rods via hot-caliber rolling. *Materialia*. 2020, vol. 12, article 100729. <https://doi.org/10.1016/j.mta.2020.100729>
 12. Makeev D.B., Kozlova O.N., Polulyakh L.A., Petelin A.L., Aleksandrov A.A., Dashevskii V.Ya. Involvement of the domestic manganese ores in production. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020, vol. 2020, no. 9, pp. 938–941. <https://doi.org/10.1134/S0036029520090098>
 13. Dashevskii V.Ya., Makeev D.B., Polulyakh L.A., Aleksandrov A.A., Leont'ev L.I. Dephosphorization of manganese-containing oxide melts. *Doklady Physical Chemistry*. 2017, vol. 473, pp. 55–57. <https://doi.org/10.1134/S0012501617040017>
 14. Polulyakh L.A., Dashevskii V.Ya., Travyanov A.Ya., Yusfin Yu.S., Petelin A.L. Behavior of phosphorus in blast furnace during smelting hot metal and ferromanganese. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2009, vol. 52, no. 3, pp. 3–5. (In Russ.).
 15. Liao Y., Pourzal R., Stemmer P., Wimmer M.A., Jacobs J.J., Fischer A., Marks L.D. New insights into hard phases of CoCrMo metal-on-metal hip replacements. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2012, vol. 12, pp. 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2012.03.013>
 16. Caudillo M., Herrera-Trejo M., Castro M.R., Ramírez E., González C.R., Juárez J.I. On carbide dissolution in an as-cast ASTM F-75 alloy. *Journal of Biomedical Materials Research*. 2002, vol. 59, no. 2, pp. 378–385. <https://doi.org/10.1002/jbm.10001>
 17. Kaiser R., Williamson K., O'Brien C., Ramirez-Garcia S., Browne D.J. The influence of cooling conditions on grain size, secondary phase precipitates and mechanical properties of biomedical alloy specimens produced by investment casting. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2013, vol. 24, pp. 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2013.04.013>
 18. Yamanaka K., Mori M., Chiba A. Assessment of precipitation behavior in dental castings of a Co–Cr–Mo alloy. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2015, vol. 50, pp. 268–276. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.06.020>
 19. Rosenthal R., Cardoso B.R., Bott I.S., Paranhos R.P.R., Carvalho E.A. Phase characterization in as-cast F-75 Co–Cr–Mo–C alloy. *Journal of Materials Science*. 2010, vol. 45, pp. 4021–4028. <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4480-x>
 20. Chiba A., Lee S.-H., Matsumoto H., Nakamura M. Construction of processing map for biomedical Co–28Cr–6Mo–0.16N alloy by studying its hot deformation behavior using compression tests. *Materials Science and Engineering: A*. 2009, vol. 513–514, pp. 286–293. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.02.044>

21. Guo S., Wu S., Guo J., Shen Y., Zhang W. An investigation on the hot deformation behavior and processing maps of Co-Ni-Cr-W-based superalloy // *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. Vol. 74. P. 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.11.060>
22. Kartika I., Li Y., Matsumoto H., Chiba A. Constructing processing maps for hot working of Co-Ni-Cr-Mo superalloy // *Materials Transactions*. 2009. Vol. 50. No. 9. P. 2277–2284. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2009103>
23. Ghosh S. Interpretation of microstructural evolution using dynamic materials modeling // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2000. Vol. 31. P. 2973–2974. <https://doi.org/10.1007/BF02830342>
24. Ma X., Zeng W., Wang K., Lai Y., Zhou Y. The investigation on the unstable flow behavior of Ti17 alloy in $\alpha+\beta$ phase field using processing map // *Materials Science and Engineering: A*. 2012. Vol. 550. P. 131–137. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.045>
25. Yamashita Y., Li Y., Onodera E., Matsumoto H., Chiba A. Dynamic recrystallization behavior of biomedical CCM alloy with additions of C and N // *Materials Transactions*. 2010. Vol. 51. No. 9. P. 1633–1639. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MAW201007>
26. Li Y., Li J., Koizumi Y., Chiba A. Dynamic recrystallization behavior of biomedical Co-29Cr-6Mo-0.16N alloy // *Materials Characterization*. 2016. Vol. 118. P. 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.05.004>
27. Prasad Y.V.R.K., Rao K.P., Sasidhara S. *Hot Working Guide: A Compendium of Processing Maps*. Ohio: ASM International, 2015. 545 p.
28. Prasad Y.V.R.K., Rao K. Processing maps and rate controlling mechanisms of hot deformation of electrolytic tough pitch copper in the temperature range 300–950 °C // *Materials Science and Engineering: A*. 2005. Vol. 391. No. 1–2. P. 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.08.049>
29. Evans R.W., Scharning P.J. Axisymmetric compression test and hot working properties of alloys // *Materials Science and Technology*. 2001. Vol. 17. No. 8. P. 995–1004. <https://doi.org/10.1179/026708301101510843>
21. Guo S., Wu S., Guo J., Shen Y., Zhang W. An investigation on the hot deformation behavior and processing maps of Co-Ni-Cr-W-based superalloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. vol. 74, pp. 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.11.060>
22. Kartika I., Li Y., Matsumoto H., Chiba A. Constructing processing maps for hot working of Co-Ni-Cr-Mo superalloy. *Materials Transactions*. 2009, vol. 50, no. 9, pp. 2277–2284. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2009103>
23. Ghosh S. Interpretation of microstructural evolution using dynamic materials modeling. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2000, vol. 31, pp. 2973–2974. <https://doi.org/10.1007/BF02830342>
24. Ma X., Zeng W., Wang K., Lai Y., Zhou Y. The investigation on the unstable flow behavior of Ti17 alloy in $\alpha+\beta$ phase field using processing map. *Materials Science and Engineering: A*. 2012, vol. 550, pp. 131–137. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.045>
25. Yamashita Y., Li Y., Onodera E., Matsumoto H., Chiba A. Dynamic recrystallization behavior of biomedical CCM alloy with additions of C and N. *Materials Transactions*. 2010, vol. 51, no. 9, pp. 1633–1639. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MAW201007>
26. Li Y., Li J., Koizumi Y., Chiba A. Dynamic recrystallization behavior of biomedical Co-29Cr-6Mo-0.16N alloy. *Materials Characterization*. 2016, vol. 118, pp. 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2016.05.004>
27. Prasad Y.V.R.K., Rao K.P., Sasidhara S. *Hot Working Guide: A Compendium of Processing Maps*. Ohio: ASM International, 2015, 545 p.
28. Prasad Y.V.R.K., Rao K. Processing maps and rate controlling mechanisms of hot deformation of electrolytic tough pitch copper in the temperature range 300–950 °C. *Materials Science and Engineering: A*. 2005, vol. 391, no. 1–2, pp. 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.08.049>
29. Evans R.W., Scharning P.J. Axisymmetric compression test and hot working properties of alloys. *Materials Science and Technology*. 2001, vol. 17, no. 8, pp. 995–1004. <https://doi.org/10.1179/026708301101510843>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юрий Владимирович Гамин, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ORCID: 0000-0001-6654-4236

E-mail: y.gamin@mail.ru

Андрей Викторович Коротицкий, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории «Ультрамелкозернистые металлические материалы», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ORCID: 0000-0002-7276-0119

E-mail: akorotitskiy@gmail.com

Татьяна Юрьевна Кин, аспирант кафедры «Обработка металлов давлением», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ORCID: 0000-0001-7730-6700

E-mail: tatianakin@mail.ru

Сергей Павлович Галкин, д.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ORCID: 0000-0002-0853-3966

E-mail: glk-omd@yandex.ru

Сергей Алексеевич Костин, директор по развитию, АО «Завод Качественных Сплавов»

E-mail: kostin@ezks.ru

Евгений Олегович Тихомиров, магистр кафедры «Обработка металлов давлением», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

E-mail: tikhomirov.evgenij@yandex.ru

Yurii V. Gamin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Metal Forming”, National University of Science and Technology “MISIS”

ORCID: 0000-0001-6654-4236

E-mail: y.gamin@mail.ru

Andrei V. Korotitskii, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher of the Laboratory “Ultrafine-Grained Metal Materials”, National University of Science and Technology “MISIS”

ORCID: 0000-0002-7276-0119

E-mail: akorotitskiy@gmail.com

Tat'yana Yu. Kin, Postgraduate of the Chair “Metal Forming”, National University of Science and Technology “MISIS”

ORCID: 0000-0001-7730-6700

E-mail: tatianakin@mail.ru

Sergei P. Galkin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair “Metal Forming”, National University of Science and Technology “MISIS”

ORCID: 0000-0002-0853-3966

E-mail: glk-omd@yandex.ru

Sergei A. Kostin, Director of Development, JSC “Plant of Quality Alloys”

E-mail: kostin@ezks.ru

Evgenii O. Tikhomirov, Master Student of the Chair “Metal Forming”, National University of Science and Technology “MISIS”

E-mail: tikhomirov.evgenij@yandex.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Ю. В. Гамин – формирование основной концепции, постановка цели и задачи исследования, подготовка текста, формулировка выводов.

А. В. Коротицкий – проведение расчетов, испытаний образцов, подготовка текста статьи.

Т. Ю. Кин – проведение расчетов, анализ результатов исследований.

С. П. Галкин – научное руководство, корректировка текста, корректировка выводов.

С. А. Костин – подготовка эксперимента, руководство проведением эксперимента, обеспечение ресурсами.

Е. О. Тихомиров – проведение экспериментов, обработка результатов исследований.

Yu. V. Gamin – formation of the main concept, goal and objectives of the study; writing the text, formulation of the conclusions.

A. V. Korotitski – conducting the calculations, writing the text, testing the samples.

T. Yu. Kin – conducting the calculations, analysis of the research results.

S. P. Galkin – scientific guidance, correction of the text and conclusions.

S. A. Kostin – preparation and management of the experiments, provision of the resources.

E. O. Tikhomirov – conducting the experiments, processing of the research results.

Поступила в редакцию 24.10.2022

После доработки 10.11.2022

Принята к публикации 10.11.2022

Received 24.10.2022

Revised 10.11.2022

Accepted 10.11.2022



Оригинальная статья

УДК 53.043

DOI 10.17073/0368-0797-2022-11-798-805

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2433>

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЛАСТЕЙ КОМПОЗИТОВ WC – (Fe – Mn – C) ПОСЛЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ ПО СТАЛИ

Н. Л. Савченко, И. Н. Севостьянова, С. Ю. Тарасов

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН (Россия, 634055, Томск, Академический пр., 2/4)

Аннотация. Изучены трибологические характеристики, фазовый состав поверхностей трения и микротвердость приповерхностных областей композитов WC–(Fe–Mn–C) с двухфазной матрицей из ($\gamma + \alpha'$)-железа, содержащей 4 % (по массе) Mn (WC – 80Г4), и однофазной матрицей из γ -железа, имеющей в составе 20 % (по массе) Mn (WC – 80Г20), после трения по диску из быстрорежущей стали при контактном давлении 5 МПа и скоростях скольжения в диапазоне от 10 до 37 м/с. Интенсивность изнашивания WC – 80Г4 и WC – 80Г20 увеличивалась с ростом скорости скольжения, при этом скорость изнашивания WC – 80Г20 при фиксированных скоростях скольжения была примерно в три раза выше, чем у WC – 80Г4. Значения коэффициента трения снижаются с увеличением скорости скольжения таким образом, что при фиксированных скоростях скольжения значения коэффициента трения у WC – 80Г4 были ниже, чем у WC – 80Г20. Количество сложного оксида FeWO₄, образовавшегося при трибоокислении изнашиваемой поверхности композитов, увеличивалось со скоростью скольжения и было прямо пропорционально значениям интенсивности изнашивания и обратно пропорционально показателям коэффициента трения. При фиксированных скоростях скольжения трибоокисление WC – 80Г4 приводит к образованию на поверхности трения большого количества FeWO₄ по сравнению с композитом WC – 80Г20. Индентирование изношенных поверхностей пирамидкой Виккерса показало, что характер сопротивления вдавливанию у трибослоев, образованных при высоких скоростях скольжения (30 и 37 м/с), отличается от такового для трибослоев, полученных при относительно низких скоростях скольжения (10 и 20 м/с). А именно, поверхности трения после высоких скоростей скольжения характеризовались более вязким поведением. Измерение значений микротвердости композитов WC – 80Г4 и WC – 80Г20, полученные после индентирования от поверхности трения вглубь материала, зафиксировало факт упрочнения приповерхностных областей композитов WC – 80Г4 и, напротив, разупрочнения в случае WC – 80Г20. Таким образом, в условиях сильного разогрева и интенсивной пластической деформации поверхности, структурно-фазовое состояние подложки композитов WC–(Fe–Mn–C), на которой формируется вязкий защитный трибослой, оказывается очень важным фактором. Именно двухфазная ($\gamma + \alpha'$) стальная матрица обеспечивает в условиях сильного фрикционного нагрева условия для эффективного формирования гетерофазного композиционного слоя, понижающего коэффициент трения и обладающего высоким сопротивлением разрушению при вдавливании.

Ключевые слова: композит, смазка, износ, трение, микротвердость, адаптация, карбид вольфрама, высокомарганцевая сталь

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, проекты FWRW-2021-0006, FWRW-2021-0005 и FWRW-2021-0009.

Для цитирования: Савченко Н.Л., Севостьянова И.Н., Тарасов С.Ю. Трибологические характеристики, фазовый состав и микротвердость приповерхностных областей композитов WC – (Fe – Mn – C) после высокоскоростного скольжения по стали // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 11. С. 798–805. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-798-805>

Original article

TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS, PHASE COMPOSITION AND MICROHARDNESS OF SUBSURFACE REGIONS OF WC – (Fe – Mn – C) COMPOSITES AFTER HIGH-SPEED SLIDING ON STEEL

N. L. Savchenko, I. N. Sevost'anova, S. Yu. Tarasov

Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (2/4 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

Abstract. The authors investigated tribological characteristics, phase composition of friction surfaces and microhardness of near-surface regions of WC-(Fe-Mn-C) composites with a two-phase ($\gamma + \alpha'$) matrix containing 4 % wt. Mn (WC - 80G4), and a single-phase matrix of γ -iron containing 20 % wt. Mn (WC - 80G20) after friction on a disk of high-speed steel at a contact pressure of 5 MPa and sliding speeds in the range from 10 to 37 m/s. The wear intensity of WC - 80G4 and WC - 80G20 increased with increasing sliding speed, while the wear rate of WC - 80G20 at fixed sliding speeds was approximately three times higher than that of WC - 80G4. The values of the friction coefficient decrease with increasing sliding speed in such a way that at fixed sliding speeds the values of the friction coefficient of WC - 80G4 were lower than those of WC - 80G20. The amount of complex oxide FeWO_4 formed during tribo-oxidation of the composites' worn surface increased with the sliding speed and was directly proportional to the wear intensity and inversely proportional to the friction coefficient values. At fixed sliding speeds, tribooxidation of WC - 80G4 leads to the formation of a larger amount of FeWO_4 on the friction surface, compared to the WC - 80G20 composite. Indentation of worn surfaces with a Vickers pyramid showed that the nature of indentation resistance of tribolayers formed at high sliding speeds (30 m/s and 37 m/s) differs from that for tribolayers obtained at relatively low sliding speeds (10 and 20 m/s), namely, the friction surfaces after high sliding speeds were characterized by a more tough behavior. Measurement of microhardness values of the WC - 80G4 and WC - 80G20 composites obtained after indentation from the friction surface into the depth of the material recorded the fact of hardening of the near-surface regions of the WC - 80G4 composites and, on the contrary, softening in the case of WC - 80G20. Thus, under conditions of strong heating and severe plastic deformation of the surface, structural-phase state of the substrate of WC-(Fe-Mn-C) composites, on which this viscous protective tribolayer is formed, turns out to be a very important factor. It is the two-phase ($\gamma + \alpha'$) steel matrix that, under conditions of strong frictional heating, provides the conditions for effective formation of a heterophase composite layer that reduces the friction coefficient and has a high resistance to fracture upon indentation.

Keywords: composite, lubrication, wear, friction, microhardness, adaptation, tungsten carbide, high-manganese steel

Funding: The work was carried out within the framework of the state task of the Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, projects FWRW -2021-0006, FWRW -2021-0005 and FWRW-2021-0009.

For citation: Savchenko N.L., Sevost'anova I.N., Tarasov S.Yu. Tribological characteristics, phase composition and microhardness of subsurface regions of WC - (Fe - Mn - C) composites after high-speed sliding on steel. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 11, pp. 804–805. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-798-805>

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее перспективным металлом для полной или частичной замены кобальта и никеля в твердых сплавах, металлокерамике и наплавках является железо [1 – 4]. Твердые сплавы со связующими на основе железа по своим характеристикам оказываются хуже, чем соответствующие сплавы с кобальтом, но обладают низкой стоимостью, способностью к термической обработке и довольно высокой прочностью. Недостатки же связаны, в основном, с плохой смачиваемостью карбидной фазы, опасностью образования охрупчивающих композитных продуктов реакции, и могут быть устранены путем правильного выбора компонентов и технологии приготовления [1 – 3] композитов.

Среди большого разнообразия металломатричных композитов (ММК), ММК со связкой в виде высокомарганцевой стали широко используются в качестве бурового инструмента в горной, угольной и нефтедобывающей промышленности благодаря их уникальным свойствам. В частности, закалка такой матрицы на твердый раствор (аустенит) позволяет создать композит с высокой эффективностью сопротивления пластической деформации и ударным нагрузкам [1 – 4]. В условиях сильного удара и вибрации аустенит связки частично может трансформироваться в мартенсит, который обладает высокой твердостью и хорошей износостойкостью, тогда как часть связки при этом остается аустенитной. Это позволяет прочно удерживать керамические частицы упрочняющей фазы [1 – 4].

Для снижения износа и трения в высокотемпературных условиях скольжения, например, в двигателях внутреннего сгорания или реактивных двигателях, при вы-

сокоскоростной обработке металлов и т. д., необходимо использовать композиты, устойчивые к высокотемпературному трибоокислению [5 – 8]. С другой стороны, трибоокисление компонентов композита с образованием защитных трибослоев может служить эффективным механизмом адаптации материалов в экстремальных условиях трения [9, 10].

В работе [11] показано, что композиты WC-(Fe-Mn-C) с со стальными матрицами при высокоскоростном скольжении по стальному диску в диапазоне скоростей от 7 до 37 м/с демонстрируют эффект трибологической адаптации с образованием трибологического слоя, обогащенного сложным оксидом FeWO_4 . Максимальный антифрикционный эффект генерируемого *in situ* FeWO_4 был продемонстрирован на примере композита WC - сталь с двухфазной ($\gamma + \alpha'$) матрицей, содержащей 4 % (по массе) Mn при скольжении по стали со скоростью 37 м/с, где был достигнут коэффициент трения $\sim 0,075$.

К настоящему времени остается невыясненным вопрос о физической природе улучшения трибологических свойств композитов WC-(Fe-Mn-C) с двухфазной ($\gamma + \alpha'$) матрицей в сравнении с однофазной матрицей из γ -железа.

В работе изучены трибологические характеристики, фазовый состав поверхностей трения и микротвердость приповерхностных областей композитов WC-(Fe-Mn-C) с матрицами, состоящими из ($\gamma + \alpha'$)-железа, имеющими в составе 4 % (по массе) Mn, и γ -железа, имеющими в составе 20 % (по массе) Mn, после трения по диску из быстрорежущей стали при контактном давлении 5 МПа и скоростях скольжения в диапазоне от 10 до 37 м/с.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Композиты с металлической матрицей WC-(Fe-Mn-C) получали методом пропитки пористых каркасов WC смесью эвтектического состава (30 % WC (по массе) – сталь Fe-Mn-C) в вакуумной печи при остаточном давлении аргона 0,8 МПа, температуре 1350 °С и последующей закалкой в масло от температуры 1150 °С. Общее количество углерода в матрице составляло около 0,8 % (по массе) для всех образцов. Матрица была преднамеренно легирована марганцем для получения образцов с матрицами Fe-Mn-C, которые содержали либо 4 % (по массе) Mn (WC – 80Г4), либо 20 % (по массе) Mn (WC – 80Г20). Полученные композиты имели в своем составе 80 ± 2 % зерен WC (по массе) и 20 ± 2 % стальной матрицы.

Окончательные размеры образцов составляли $5 \times 5 \times 7$ мм. Оба композита WC – 80Г4 и WC – 80Г20 имели один и тот же тип микроструктуры со средним размером карбидного зерна и расстоянием между частицами карбидов $2,7 \pm 0,5$ и $1,2 \pm 0,2$ мкм соответственно. Металлографическая пористость не превышала 0,5 %.

Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7 с $\text{Cu-K}\alpha$ излучением. Он показал наличие в WC – 80Г20 фаз WC и $\gamma\text{-Fe}$, тогда как в WC – 80Г4 матрица дополнительно содержала около 20 ± 5 % мартенситной фазы $\alpha'\text{-Fe}$ (по объему).

Трибологические испытания композитов по схеме палец-диск проводили на универсальной машине трения УМТ-1. В качестве контртела использовали диск из литой быстрорежущей стали с твердостью 63 – 65 HRC. Испытания проводили при номинальном контактном давлении 5 МПа в диапазоне скоростей 10 – 37 м/с (10, 20, 30, 37 м/с). Износ оценивали путем измерения высоты образца до и после испытания.

Изношенные поверхности исследовали с помощью прибора SEM Philips SEM-515 с приставкой для энергодисперсионного микроанализа EDAX ECON IV. Данные по микротвердости получали на микротвердомере Duramin-5.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Интенсивность изнашивания (W) WC – 80Г4 и WC – 80Г20 увеличивалась с ростом скорости скольжения (рис. 1, а), при этом скорость изнашивания WC – 80Г20 при фиксированных скоростях скольжения была примерно в три раза выше, чем у WC – 80Г4. Значения коэффициента трения (f) снижаются с увеличением скорости скольжения таким образом, что при фиксированных скоростях скольжения значения коэффициента трения WC – 80Г4 были ниже, чем у WC – 80Г20 (рис. 1, б).

Проведенный РФА изношенных поверхностей показал, что помимо фаз WC, $\gamma\text{-Fe}$ в WC – 80Г20 и ($\gamma + \alpha'$)-Fe

в WC – 80Г4, в обоих композитах идентифицируется фаза FeWO_4 (рис. 2, а). По данным, полученным в результате полуколичественного рентгенофазового анализа соответствующих отражений от изношенных поверхностей, количество вольфрамата железа FeWO_4 , образовавшегося при трибоокислении образцов, растет с увеличением скорости скольжения (от 10 до 37 м/с) с 10 до 16 % (об.) в WC – 80Г4 и с 4 до 10 % (об.) в WC – 80Г20.

Приведенные на рис. 2, б, в корреляционные зависимости между количеством формирующегося на поверхности трения FeWO_4 и трибологическими свойствами композитов (интенсивностью изнашивания W и коэффициентом трения f) ясно показывают, что количество сложного оксида прямо пропорционально значениям интенсивности изнашивания и обратно пропорционально значениям коэффициента трения. Необходимо отметить, что при фиксированных скоростях скольжения трибоокисление WC – 80Г4 приводит к образованию на поверхности трения большего количества FeWO_4 , по сравнению с композитом WC – 80Г20 (рис. 2, б, в).

Изношенные поверхности композитов обоих составов после всех скоростей скольжения характеризуются

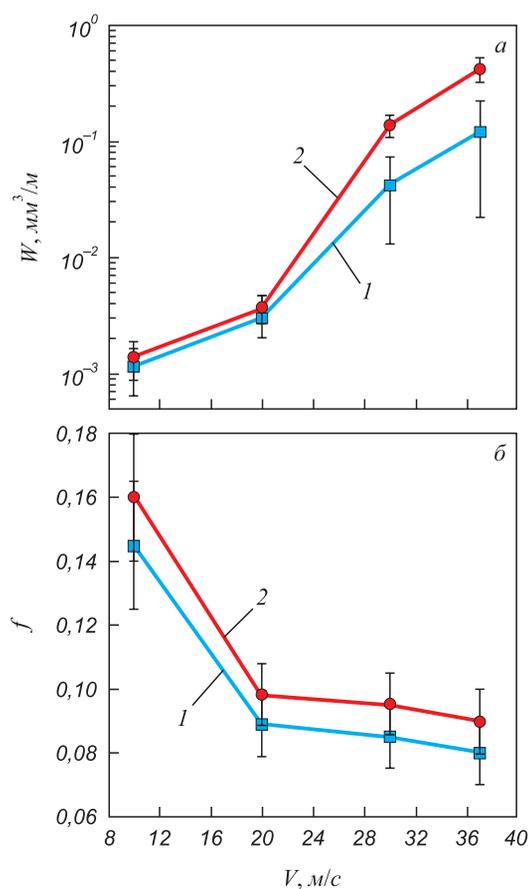


Рис. 1. Зависимость значений интенсивности изнашивания W (а) и коэффициента трения f (б) композитов WC – 80Г4 (1) и WC – 80Г20 (2) от скорости скольжения

Fig. 1. Dependence of wear rate W (а) and friction coefficient (f) of WC – 80Г4 (1) and WC – 80Г20 (2) composites on sliding speed

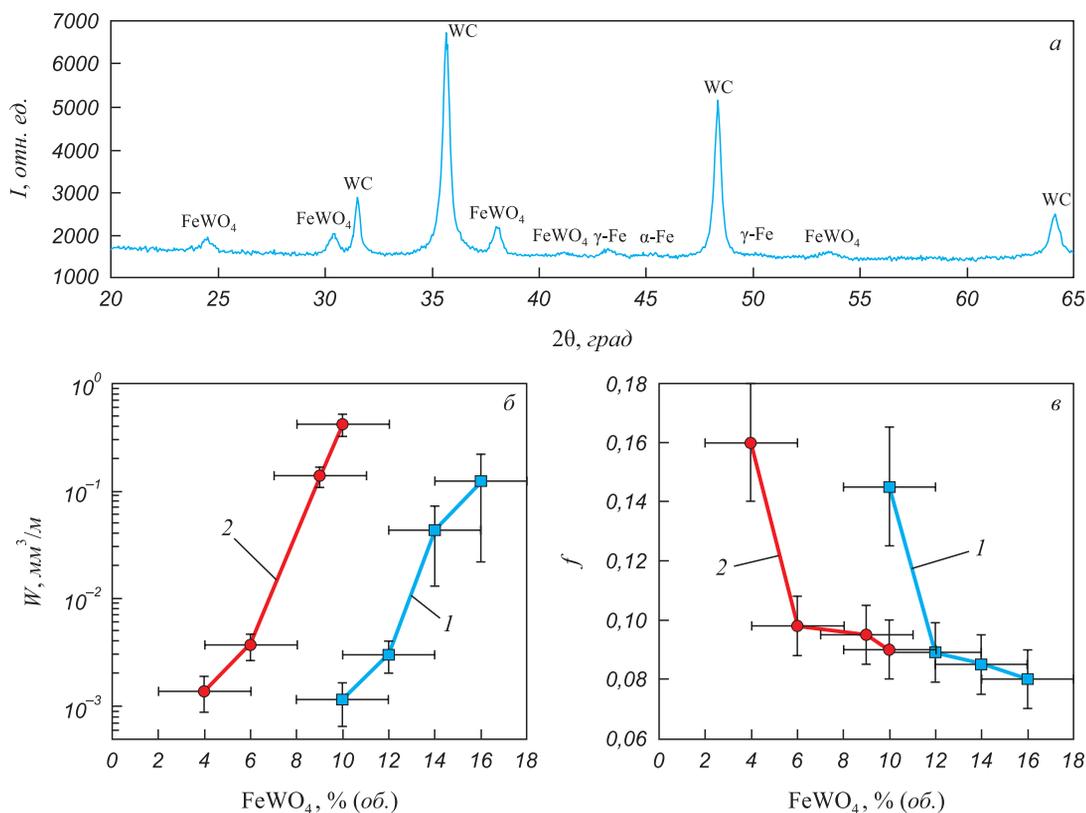


Рис. 2. Рентгенограмма изношенной поверхности WC – 80Г4 после скорости скольжения 37 м/с (а), зависимости интенсивности изнашивания W (б) и коэффициента трения f (в) от содержания FeWO₄ на изношенной поверхности композитов WC – 80Г4 (1) и WC – 80Г20 (2)

Fig. 2. X-ray patterns of the worn surface of WC – 80G4 after a sliding speed of 37 m/s, dependences wear rate W (б) and friction coefficient f (в) on the content of FeWO₄ on the worn surface of WC – 80G4 (1) and WC – 80G20 (2) composites

наличием светлых и серых участков (рис. 3). По данным энергодисперсионного микроанализа яркие контрастные области были идентифицированы как зерна и фрагменты WC, которые агломерировались и уплотнились, вытесняя стальную связку в процессе скольжения по стальному диску. Серые области представляют собой слои переноса, которые включают в себя, помимо сильно фрагментированных зерен WC, окисленные компоненты стального контртела и стальной связки композита. После скоростей скольжения 30 и 37 м/с на изношенных поверхностях обоих композитов формировался сплошной трибослой, состоящий из мелких фрагментов окисленных компонентов композита и стального контртела (рис. 3, в, з).

Инденитрование изношенных поверхностей пирамидкой Виккерса при нагрузке 100 Н показало, что характер сопротивления такому инденитрованию у трибослоев, образованных при высоких скоростях скольжения (30 и 37 м/с), отличается от такового для трибослоев, полученных при относительно низких скоростях скольжения (10 и 20 м/с). Они демонстрируют формирование на поверхности многочисленных трещин (рис. 3, а), отслаиваемых областей с интеркристаллитным разрушением скопления фрагментированных зерен WC (рис. 3, б). Поверхности трения после высоких скоростей скольже-

ния характеризовались более вязким поведением, когда можно было наблюдать скопление материала на краях отпечатка инденитора, возникающее в результате пластического течения (рис. 3, в, з).

На рис. 4 представлены зависимости изменения значений микротвердости композитов WC – 80Г4 и WC – 80Г20, полученных после инденитрования от поверхности трения вглубь материала. Пунктирные линии на рис. 4 обозначают средние значения микротвердости, присущие композитам до испытаний на трение. Видно, что в композите WC – 80Г4 значения микротвердости вблизи поверхности трения заметно выше, чем в объеме материала (рис. 4, а – в). По мере удаления от поверхности трения вглубь материала значения микротвердости постепенно уменьшаются и на глубине 100 – 200 мкм восстанавливаются до исходных значений, характерных для объема материала, не подвергнутого воздействию трения. В композите WC – 80Г20, напротив, наблюдается уменьшение микротвердости приповерхностного слоя (рис. 4, з – е).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные трибологические исследования показали, что коэффициент трения композитов WC – 80Г4

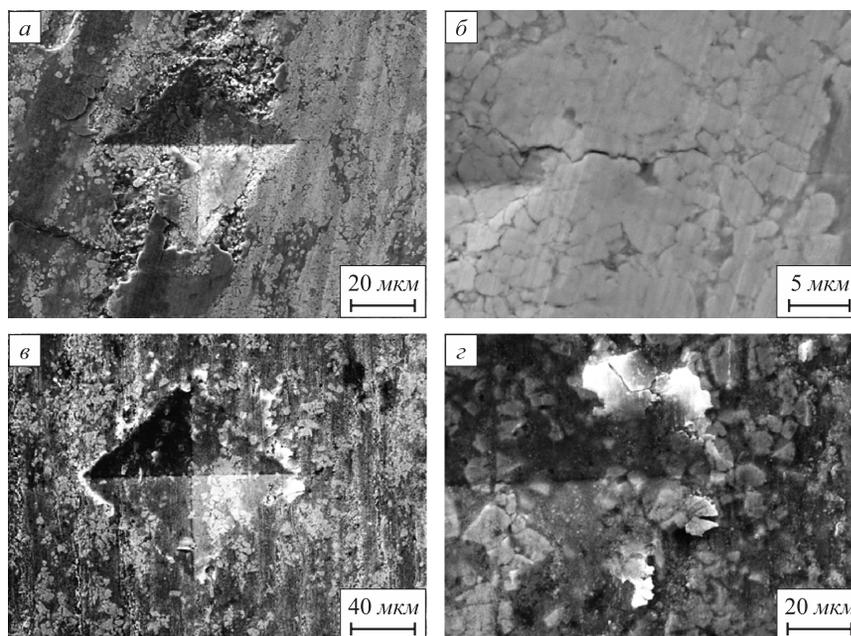


Рис. 3. Изображения РЭМ отпечатков индентора Виккерса на поверхности трения композита WC – 80Г4: после трения при скорости 20 м/с (а, б); после трения при скорости 37 м/с (в, г)

Fig. 3. SEM images of the Vickers indenter impressions on friction surface of WC – 80G4 composite: а, б – after friction at 20 m/s; в, г – after friction at 37 m/s

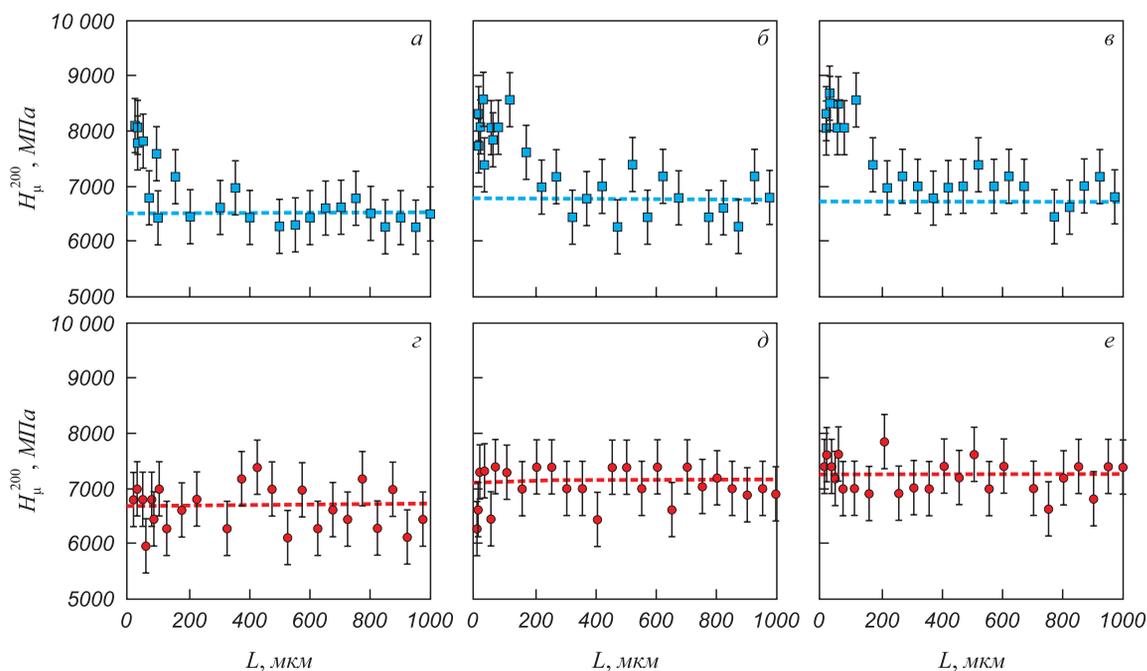


Рис. 4. Изменение микротвердости H_{μ}^{200} композитов WC – 80Г4 (а – в) и WC – 80Г20 (г – е) от поверхности трения в глубину образцов после испытания на трение при скорости скольжения: 10 м/с (а, г); 20 м/с (б, д); 37 м/с (в, е)

Fig. 4. Change of microhardness H_{μ}^{200} of composites WC – 80G4 (а – в) and WC – 80G20 (г – е) from the friction surface to the samples depth after friction test a sliding speed: 10 m/s (а, г); 20 m/s (б, д); 37 m/s (в, е)

и WC – 80Г20 при скорости скольжения 37 м/с опускался до очень низких значений, приблизительно 0,08 – 0,07 (см. рис. 1, б). Такое поведение логично связать с эффектом трибологической адаптации, связанного с трибохимическим образованием самовосстанов-

ливающегося приповерхностного защитного слоя. Он состоит из мелких фрагментов WC и продуктов износа, имеющих в составе *in situ* синтезированный в процессе высокоскоростного скольжения сложный оксид $FeWO_4$ (см. рис. 2), который способен выступать в роли твер-

дой смазки за счет наличия кристаллографических плоскостей легкого скольжения [6, 10, 11].

Рассматриваемые композиты интенсивно нагреваются во время скольжения со скоростью 37 м/с, так что температуры фрикционного контакта могут быть близки к температуре плавления стали [11]. Такая термическая пластификация способствует переносу компонентов быстрорежущей стали с контртела на изнашиваемую поверхность композитов, а также преимущественному выходу компонентов стальной матрицы композитов из объема. Все эти компоненты могут смешиваться и окисляться по реакции [11]



Фрагментация зерен WC на изнашиваемой поверхности композитов приводит к формированию дисперсных частиц, которые легко окисляются до WO_3 , начиная приблизительно с 800 °C [12]:



Положительный эффект такого окисления заключается в том, что создаются условия для синтеза вольфрамата железа из оксидов железа (1) и WO_3 (2), начиная приблизительно с 600 °C [13, 14]:



Измерение значений микротвердости композитов WC – 80Г4 и WC – 80Г20 от поверхности трения вглубь материала позволило установить факт упрочнения приповерхностных областей композитов WC – 80Г4 (рис. 4, а – в) и, напротив, разупрочнения WC – 80Г20 (рис. 4, г – е). Ранее было показано [15], что композит WC – 80Г4 имеет меньшую скорость изнашивания при скольжении в диапазоне скоростей 1 – 4 м/с по сравнению с WC – 80Г20. Это различие связано с тем, что WC – 80Г4 имел метастабильную двухфазную ($\gamma + \alpha'$) матрицу, которая подвергалась деформационно-индуцированному $\gamma \rightarrow \alpha'$ фазовому превращению и наклепу. Такое предположение может быть верным только в случае малого фрикционного нагрева, в то время как высокоскоростное скольжение выделяет гораздо больше тепла, поэтому фазовое превращение $\alpha' \rightarrow \gamma$ становится более реальным. В этих условиях двухфазная матрица WC – 80Г4 будет демонстрировать более высокое сопротивление пластической деформации и, следовательно, более эффективно удерживать карбидные зерна до момента полного $\alpha' \rightarrow \gamma$ фазового превращения. Однако к этому времени матрица γ -фазы композита WC – 80Г20 будет термически размягчена и не сможет эффективно удерживать зерна WC.

Таким образом, в условиях сильного разогрева и интенсивной пластической деформации поверхности структурно-фазовое состояние подложки композитов

WC – (Fe – Mn – C), на которой формируется этот вязкий защитный трибослой, оказывается очень важным фактором. Именно двухфазная ($\gamma + \alpha'$) стальная матрица обеспечивает в условиях сильного фрикционного нагрева условия для эффективного формирования гетерофазного композиционного слоя, понижающего коэффициент трения (см. рис. 1, б, рис. 2, в) и обладающего высоким сопротивлением разрушению при вдавливании (см. рис. 2, в, г).

Результаты исследования можно использовать при разработке различных самосмазывающихся гибридных композитов для работы в условиях высокотемпературных фрикционных контактов при высокоскоростном скольжении в гибридных парах трения (со стальными контртелами). Несмотря на проявление эффекта самосмазывания, уровень интенсивности изнашивания WC – 80Г4 и WC – 80Г20, зафиксированный в настоящем исследовании, недостаточно высок. Как показали сравнения, выполненные в работе [11], при высоких скоростях скольжения композиты WC – 80Г4 и WC – 80Г20 сильно проигрывают керамическим композитам на основе диоксида циркония и диборида циркония. Очевидно, для того, чтобы найденный эффект самосмазывания и самозалечивания воплотить в эффективно действующих гибридных парах трения (в паре со сталью), необходимо часть стальной связки заменить на подходящую по свойствам керамическую часть. Керамика на основе диоксида циркония, армированная оксидом алюминия, может быть хорошим кандидатом для замены части стальной связки композитов, изученных в настоящей работе, поскольку все компоненты, такие как WC, ZrO_2 , Al_2O_3 и сталь, могут быть объединены в объемный композит [16 – 19]. Химические элементы и фазы, входящие в состав таких гибридных композитов, позволят им проявлять в процессе скольжения эффекты самосмазывания и самозалечивания за счет происходящих трибохимических окислительных реакций с образованием квазивязких трибослоев с низким напряжением на сдвиг. Это приводит к уменьшенным значениям коэффициента трения, высокой износостойкости и повышенной толерантности материала к возникающим при износе дефектам [20].

Выводы

Установлено, что увеличение скорости скольжения с 10 до 37 м/с при трении композитов WC – 80Г4 и WC – 80Г20 по стальному контртелу приводит к увеличению интенсивности изнашивания и снижению коэффициента трения таким образом, что при фиксированных скоростях скольжения значения интенсивности изнашивания и коэффициента трения композита WC – 80Г20 всегда выше по сравнению с WC – 80Г4.

Количество сложного оксида FeWO_4 , образовавшегося при трибоокислении изнашиваемой поверхности композитов, увеличивалось со скоростью скольжения

и было прямо пропорционально значениям интенсивности изнашивания и обратно пропорционально значениям коэффициента трения. При фиксированных скоростях скольжения трибоокисление WC – 80Г4 приводит к образованию на поверхности трения большего количества $FeWO_4$, по сравнению с композитом WC – 80Г20.

Измерение значений микротвердости композитов WC – 80Г4 и WC – 80Г20, полученные после индентирования от поверхности трения вглубь материала, зафиксировало факт упрочнения приповерхностных областей композитов WC – 80Г4 и, напротив, разупрочнения в случае WC – 80Г20.

Показано, что в условиях сильного разогрева и интенсивной пластической деформации поверхности структурно-фазовое состояние подложки композитов WC–(Fe–Mn–C), на которой формируется вязкий защитный трибослой, оказывается очень важным фактором. Именно эффект подповерхностного упрочнения, индуцированного высокоскоростным скольжением композитов WC–(Fe–Mn–C) с двухфазной ($\gamma + \alpha'$) стальной матрицей, обеспечил условия для эффективного формирования достаточного количества сложного оксида $FeWO_4$ на изнашиваемой поверхности, понижающего коэффициент трения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

- Kübarssepp J., Juhani K. Cermets with Fe-alloy binder: A review // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2020. Vol. 92. Article 105290. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105290>
- Zhang X., Yang F., Zeng C., Ma W., Guo Z. Fabrication and properties of TiC-high manganese steel cermet processed by 3D gel printing // *Journal of Materials Science*. 2021. Vol. 56. No. 25. P. 19709–19722. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06563-0>
- Li G., Jia J., Lyu Y., Zhao J., Lu J., Li Y., Luo F. Effect of Mo addition mode on the microstructure and mechanical properties of TiC–high Mn steel cermets // *Ceramics International*. 2020. Vol. 46. No. 5. P. 5745–5752. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.023>
- Savchenko N.L., Gnyusov S.F., Kul'kov S.N. Structures formed during the friction of a metal-ceramic composite on steel under high-velocity sliding conditions // *Technical Physics Letters*. 2009. Vol. 35. P. 107–110. <https://doi.org/10.1134/S1063785009020035>
- Kumar R., Antonov M. Self-lubricating materials for extreme temperature tribo-applications // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 44. Part 6. P. 4583–4589. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.824>
- Zhai W., Bai L., Zhou R., Fan X., Kang G., Liu Y., Zhou K. Recent progress on wear-resistant materials: Designs, properties, and applications // *Advanced Science*. 2021. Vol. 8. No. 11. Article 2003739. <https://doi.org/10.1002/advs.202003739>
- Torres H., Ripoll M.R., Prakash B. Tribological behaviour of self-lubricating materials at high temperatures // *International Materials Reviews*. 2018. Vol. 63. No. 5. P. 309–340. <https://doi.org/10.1080/09506608.2017.1410944>
- Zhu S., Cheng J., Qiao Z., Yang J. High temperature solid-lubricating materials: A review // *Tribology International*. 2019. Vol. 133. P. 206–223. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.12.037>
- Kumar R., Hussainova I., Rahmani R., Antonov M. Solid lubrication at high-temperatures – A Review // *Materials*. 2022. Vol. 15. No. 5. Article 1695. <https://doi.org/10.3390/ma15051695>
- Voevodin A.A., Muratore C., Aouadi S.M. Hard coatings with high temperature adaptive lubrication and contact thermal management: Review // *Surface and Coatings Technology*. 2014. Vol. 257. P. 247–265. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.04.046>
- Savchenko N., Sevostyanova I., Tarasov S. Self-lubricating effect of $FeWO_4$ tribologically synthesized from WC–(Fe–Mn–C) composite during high-speed sliding against a HSS Disk // *Lubricants*. 2022. Vol. 10. No. 5. Article 86. <https://doi.org/10.3390/lubricants10050086>
- Basu S.N., Sarin V.K. Oxidation behavior of WC–Co // *Materials Science and Engineering: A*. 1996. Vol. 209. No. 1–2. P. 206–212. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)10145-4](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)10145-4)
- Sharma S.K., Kumar B.V.M., Kim Y.-W. Tribology of WC reinforced SiC ceramics: Influence of counterbody // *Friction*. 2019. Vol. 7. P. 129–142. <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0194-2>
- Kübarssepp J., Juhani K. Cermets with Fe-alloy binder: A review. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2020, vol. 92, article 105290. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105290>
- Zhang X., Yang F., Zeng C., Ma W., Guo Z. Fabrication and properties of TiC-high manganese steel cermet processed by 3D gel printing. *Journal of Materials Science*. 2021, vol. 56, no. 25, pp. 19709–19722. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06563-0>
- Li G., Jia J., Lyu Y., Zhao J., Lu J., Li Y., Luo F. Effect of Mo addition mode on the microstructure and mechanical properties of TiC–high Mn steel cermets. *Ceramics International*. 2020, vol. 46, no. 5, pp. 5745–5752. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.023>
- Savchenko N.L., Gnyusov S.F., Kul'kov S.N. Structures formed during the friction of a metal-ceramic composite on steel under high-velocity sliding conditions. *Technical Physics Letters*. 2009, vol. 35, pp. 107–110. <https://doi.org/10.1134/S1063785009020035>
- Kumar R., Antonov M. Self-lubricating materials for extreme temperature tribo-applications. *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 44, part 6, pp. 4583–4589. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.824>
- Zhai W., Bai L., Zhou R., Fan X., Kang G., Liu Y., Zhou K. Recent progress on wear-resistant materials: Designs, properties, and applications. *Advanced Science*. 2021, vol. 8, no. 11, article 2003739. <https://doi.org/10.1002/advs.202003739>
- Torres H., Ripoll M.R., Prakash B. Tribological behaviour of self-lubricating materials at high temperatures. *International Materials Reviews*. 2018, vol. 63, no. 5, pp. 309–340. <https://doi.org/10.1080/09506608.2017.1410944>
- Zhu S., Cheng J., Qiao Z., Yang J. High temperature solid-lubricating materials: A review. *Tribology International*. 2019, vol. 133, pp. 206–223. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.12.037>
- Kumar R., Hussainova I., Rahmani R., Antonov M. Solid lubrication at high-temperatures – A Review. *Materials*. 2022, vol. 15, no. 5, article 1695. <https://doi.org/10.3390/ma15051695>
- Voevodin A.A., Muratore C., Aouadi S.M. Hard coatings with high temperature adaptive lubrication and contact thermal management: Review. *Surface and Coatings Technology*. 2014, vol. 257, pp. 247–265. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.04.046>
- Savchenko N., Sevostyanova I., Tarasov S. Self-lubricating effect of $FeWO_4$ tribologically synthesized from WC–(Fe–Mn–C) composite during high-speed sliding against a HSS Disk. *Lubricants*. 2022, vol. 10, no. 5, article 86. <https://doi.org/10.3390/lubricants10050086>
- Basu S.N., Sarin, V.K. Oxidation behavior of WC–Co. *Materials Science and Engineering: A*. 1996, vol. 209, no. 1–2, pp. 206–212. [https://doi.org/10.1016/0921-5093\(95\)10145-4](https://doi.org/10.1016/0921-5093(95)10145-4)
- Sharma S.K., Kumar B.V.M., Kim, Y.-W. Tribology of WC reinforced SiC ceramics: Influence of counterbody. *Friction*. 2019, vol. 7, pp. 129–142. <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0194-2>

14. Yang G., Liu X., Sun X., Liang E., Zhang W. Synthesis process control of low-thermal-expansion $\text{Fe}_2\text{W}_3\text{O}_{12}$ by suppressing the intermediate phase Fe_2WO_6 // *Ceramics International*. 2018. Vol. 44. No. 17. P. 22032–22035. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.274>
15. Sevostyanova I.N., Savchenko N.L., Kul'kov S.N. Structural and phase binder state and behavior during friction of WC–(Fe–Mn–C) composites // *Journal of Friction and Wear*. 2010. Vol. 31. P. 281–287. <https://doi.org/10.3103/S1068366610040069>
16. Tai W.-P., Watanabe T. Fabrication and mechanical properties of Al_2O_3 –WC–Co composites by vacuum hot pressing // *Journal of the American Ceramic Society*. 1998. Vol. 81. No. 6. P. 1673–1676. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1998.tb02531.x>
17. Xia X., Li X., Li J., Zheng D. Microstructure and characterization of WC–2.8 wt % Al_2O_3 –6.8 wt % ZrO_2 composites produced by spark plasma sintering // *Ceramics International*. 2016. Vol. 42. No. 12. P. 14182–14188. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.06.044>
18. Pedzich Z., Haberko K. Toughening mechanisms in the TZP–WC particulate composites // *Key Engineering Materials*. 1997. Vol. 132–136. P. 2076–2079. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.132-136.2076>
19. Jiang D., Van der Biest O., Vleugels J. ZrO_2 –WC nanocomposites with superior properties // *Journal of the European Ceramic Society*. 2007. Vol. 27. No. 2–3. P. 1247–1251. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.05.028>
20. Savchenko N., Sevostyanova I., Grigoriev M., Sablina T., Buyakov A., Rudmin M., Vorontsov A., Moskvichev E., Rubtsov V., Tarasov S. Self-lubricating effect of WC/Y–TZP– Al_2O_3 hybrid ceramic–matrix composites with dispersed hadfield steel particles during high-speed sliding against an HSS Disk // *Lubricants*. 2022. Vol. 10. No. 7. Article 140. <https://doi.org/10.3390/lubricants10070140>
14. Yang G., Liu X., Sun X., Liang E., Zhang W. Synthesis process control of low-thermal-expansion $\text{Fe}_2\text{W}_3\text{O}_{12}$ by suppressing the intermediate phase Fe_2WO_6 . *Ceramics International*. 2018, vol. 44, no. 17, pp. 22032–22035. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.08.274>
15. Sevostyanova I.N., Savchenko N.L., Kul'kov S.N. Structural and phase binder state and behavior during friction of WC–(Fe–Mn–C) composites. *Journal of Friction and Wear*. 2010, vol. 31, pp. 281–287. <https://doi.org/10.3103/S1068366610040069>
16. Tai W.-P., Watanabe T. Fabrication and mechanical properties of Al_2O_3 –WC–Co composites by vacuum hot pressing. *Journal of the American Ceramic Society*. 1998, vol. 81, no. 6, pp. 1673–1676. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1998.tb02531.x>
17. Xia X., Li X., Li J., Zheng D. Microstructure and characterization of WC–2.8 wt % Al_2O_3 –6.8 wt % ZrO_2 composites produced by spark plasma sintering. *Ceramics International*. 2016, vol. 42, no. 12, pp. 14182–14188. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.06.044>
18. Pedzich Z., Haberko K. Toughening mechanisms in the TZP–WC particulate composites. *Key Engineering Materials*. 1997, vol. 132–136, pp. 2076–2079. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.132-136.2076>
19. Jiang D., Van der Biest O., Vleugels J. ZrO_2 –WC nanocomposites with superior properties. *Journal of the European Ceramic Society*. 2007, vol. 27, no. 2–3, pp. 1247–1251. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2006.05.028>
20. Savchenko N., Sevostyanova I., Grigoriev M., Sablina T., Buyakov A., Rudmin M., Vorontsov A., Moskvichev E., Rubtsov V., Tarasov S. Self-lubricating effect of WC/Y–TZP– Al_2O_3 hybrid ceramic–matrix composites with dispersed hadfield steel particles during high-speed sliding against an HSS Disk. *Lubricants*. 2022, vol. 10, no. 7, article 140. <https://doi.org/10.3390/lubricants10070140>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Николай Леонидович Савченко, д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории контроля качества материалов и конструкций, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН

ORCID: 0000-0001-8254-5853

E-mail: savnick@ispms.ru

Ирина Николаевна Севостьянова, к.т.н., научный сотрудник лаборатории физической мезомеханики и неразрушающих методов контроля, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН

ORCID: 0000-0001-6706-6512

E-mail: sevir@ispms.ru

Сергей Юльевич Тарасов, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории физики упрочнения поверхности, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН

ORCID: 0000-0003-0702-7639

E-mail: tsy@ispms.ru

Nikolai L. Savchenko, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the Laboratory for Quality Control of Materials and Structures, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0001-8254-5853

E-mail: savnick@ispms.ru

Irina N. Sevost'anova, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Laboratory of Physical Mesomechanics and Non-Destructive Testing, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0001-6706-6512

E-mail: sevir@ispms.ru

Sergei Yu. Tarasov, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of Physics of Surface Hardening, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0003-0702-7639

E-mail: tsy@ispms.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Н. Л. Савченко – написание текста рукописи, получение и анализ данных, обзор публикаций по теме статьи, получение данных для анализа.

И. Н. Севостьянова – получение, анализ данных, доработка текста.

С. Ю. Тарасов – научное руководство, формирование основной концепции, определение цели и задачи исследования.

N. L. Savchenko – writing the text, data obtaining and analysis, reviewing publications on the article topic.

I. N. Sevost'anova – data obtaining and analysis, revision of the text.

S. Yu. Tarasov – scientific guidance, formation of the basic concept, goals and objectives of the study.

Поступила в редакцию 24.02.2022

После доработки 20.04.2022

Принята к публикации 26.08.2022

Received 24.02.2022

Revised 20.04.2022

Accepted 26.08.2022



Оригинальная статья

УДК 669.054.82, 669.713.6.05

DOI 10.17073/0368-0797-2022-11-806-813

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2435>

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ АЛЮМОКАЛЬЦИЕВОГО ШЛАКА НА ЕГО РАССЫПАЕМОСТЬ

А. Б. Лебедев, В. С. Шуйская

Санкт-Петербургский горный университет (Россия, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2)

Аннотация. Основным компонентом металлургических шлаков являются соединения железа, которые извлекаются проведением восстановительной плавки. Известно несколько типов данного процесса с получением различных продуктов на основе железа и шлаков разного состава (алюмокальциевого саморассыпающегося и др.). Режим плавки и охлаждения образованного в процессе плавки в печи алюмокальциевого шлака должен обеспечивать наиболее полное самопроизвольное его рассыпание, а также высокие показатели извлечения из него редкоземельных металлов. Для опытов в работе выбраны синтетические шлаки, схожие по фазовому составу с промышленными образцами после выплавки железосодержащих руд. Смоделированные образцы соответствуют области первичной кристаллизации двухкальциевого силиката на тройной диаграмме состояния системы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$. Шлак после рассыпания подвергали ситовому анализу с помощью механического сита. В опытах использовались шлаки с кремниевым модулем $k = 2,0$, которые активно рассыпались в момент их охлаждения. При увеличении кремниевого модуля рассыпаемость ухудшается. Установлено, что точно ограничить области составов рассыпающихся шлаков при определенных скоростях охлаждения невозможно. Проведенные исследования показали, что рассыпаемость шлаков улучшается по мере приближения к центру области двухкальциевого силиката. Состав шлаков близок к составу точек, расположенных в области, ограниченной с одной стороны линиями $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 - 2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ и $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 - 12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$, и с другой стороны линиями кремниевого модуля не выше 2,85 – 3,00. При этом гранулометрический состав почти не зависит от скорости охлаждения. На рассыпаемость шлаков влияет температурный режим от выплавки до охлаждения. Наиболее перспективными являются шлаки с кремниевым модулем в пределах 2,85 – 3,00, близкие к фазовому треугольнику $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 - 2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$.

Ключевые слова: металлургический шлак, алюмокальциевый силикат, скорость охлаждения, рассыпаемость шлака, кремниевый модуль, ситовой анализ, гранулометрический состав

Для цитирования: Лебедев А.Б., Шуйская В.С. Влияние состава и скорости охлаждения алюмокальциевого шлака на его рассыпаемость // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 11. С. 806–813. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-806-813>

Original article

INFLUENCE OF COMPOSITION AND COOLING RATE OF ALUMOCALCIUM SLAG ON ITS CRUMBLABILITY

A. B. Lebedev, V. S. Shuiskaya

St. Petersburg Mining University (2 21st Line, Vasilievsky Island, St. Petersburg 199106, Russian Federation)

Abstract. The main components of metallurgical slags are iron compounds, which are extracted by reduction smelting. There are several types of this process with obtaining various products based on iron and slags of various compositions (aluminum-calcium self-disintegrating), etc. The mode of smelting and cooling of alumocalcium slag, formed during melting in the furnace, should ensure the most complete spontaneous crumbling of it, as well as high rates of extraction of REM from it. Synthetic slags similar in phase composition to industrial samples after smelting of iron-containing ores were selected for the experiments. The simulated samples correspond to the region of primary crystallization of bicalcium silicate on the triple state diagram of $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$ system. The slag after crumbling was subjected to a sieve analysis using a mechanical sieve. In the experiments, slags with a silicon module $k = 2.0$ were used, which actively crumbled during their cooling. With an increase in the silicon module, the crumbling deteriorates. It was established that it is impossible to precisely limit the areas of compositions of crumbling slags at certain cooling rates. The conducted studies showed that the crumblability of slags improves as it approaches the center of the bicalcium silicate region. The composition of slags close to composition of the intersection points of the lines $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 - 2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ and $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 - 12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ with the lines of the permanent silicon module granulometric composition almost does not depend on the cooling rate. The temperature mode from smelting to cooling affects the slags crumblability. The most promising are slags with a silicon module in the range of 2.85 – 3.00, close to the phase triangle $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 - 2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$.

Keywords: metallurgical slag, alumocalcium silicate, cooling rate, slag crumblability, silicon module, sieve analysis, granulometric composition

For citation: Lebedev A.B., Shuiskaya V.S. Influence of composition and cooling rate of alumocalcium slag on its crumblability. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 11, pp. 806–813. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-806-813>

ВВЕДЕНИЕ

Предложенная схема комплексной переработки бокситового сырья [1–3] во вращающихся печах предполагает получение саморассыпающихся алюмокальциевых шлаков, пригодных для извлечения из них редкоземельных металлов (РЗМ) [4, 5], и перевод железа в отдельную фазу шлака [6, 7].

Режим термообработки и последующего охлаждения выпущенного из печи шлака должен обеспечивать полное самопроизвольное его рассыпание [8–10], которое в перспективе может способствовать извлечению из него ценных компонентов, таких как титан, скандий, иттрий и т. п. [11, 12]. Важнейшими технологическими факторами, определяющими фазовые превращения в шлаке, являются его химический состав и скорость охлаждения [13–15].

Для сырья с большим содержанием SiO₂ разрабатываются альтернативные способы извлечения РЗМ [16–18]. Шлаки с кремниевым модулем 2,0 типичны для комплексной переработки, они наиболее ярко демонстрируют изменения в гранулометрическом составе после саморассыпания [19]. Полное саморассыпание образца возможно подбором режима термообработки и охлаждения для каждого состава отдельно [20, 21]. При этом важную роль играет стабильность системы, которую можно оценить на тройной диаграмме состояния [22, 23].

Согласно этим ограничениям, шлаки с кремниевым модулем 2,85 не должны рассыпаться при охлаждении со скоростью 30 °С/мин. В опытах, проведенных в работах [24, 25], часть шлаков с указанным кремниевым модулем легко рассыпалась с предложенной скоростью. Это показывает, что область, в которой происходит рассыпание, ограничена индивидуальными условиями для каждого образца (соотношение фаз и модуля) [26, 27]. Результат рассыпания зависит от термического режима (температура спекания, выдержка и скорость охлаждения состава) [28].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовались синтетические шлаки, фазовый состав которых соответствовал составу реальных шлаков, полученных в результате плавки железистых высококремниевых бокситов, а также железосодержащих руд [29]. На тройной диаграмме состояния системы CaO – SiO₂ – Al₂O₃ выбранные составы шлаков соответствуют области первичной кристаллизации двухкальциевого силиката [30–32]. На рис. 1 представлены составы шлаков с различными кремниевыми модулями (Al₂O₃/SiO₂) [33–35]. Шлаки, выплавляемые в графитовом тигле в печи Таммана, после охлаждения рассыпаются или измельчаются, тщательно перемешиваются. От усредненной пробы отбирали навеску по 70 г, затем их помещали в графитовый тигель специаль-

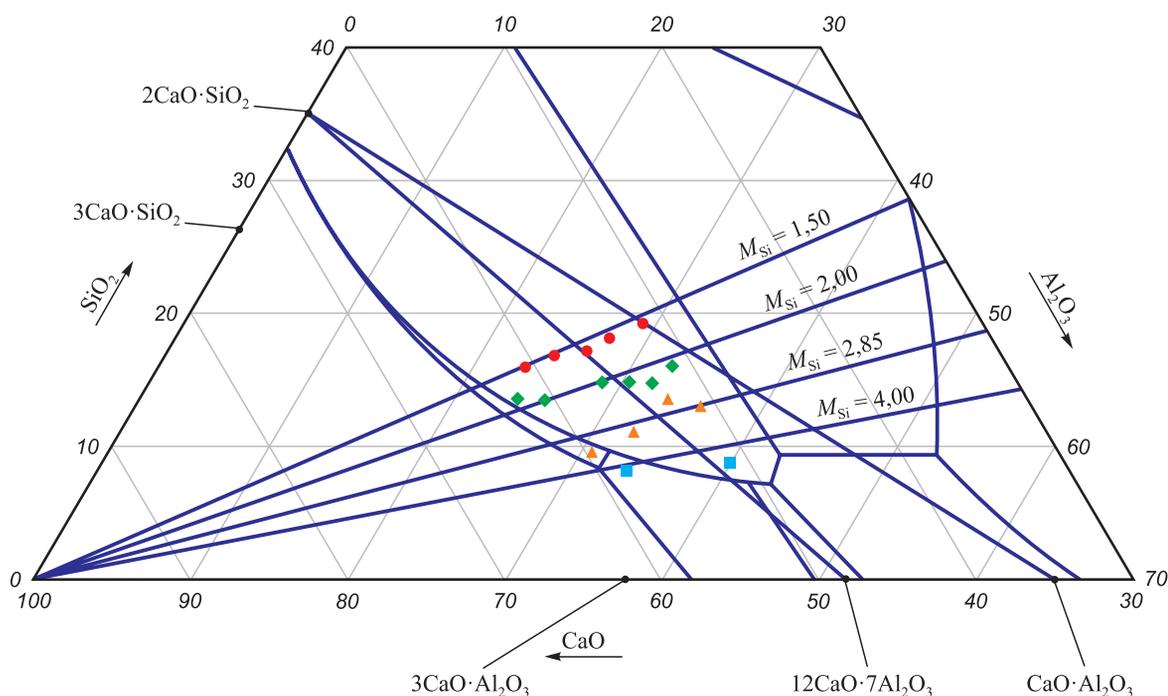


Рис. 1. Составы исследованных синтетических шлаков:

- – шлаки с кремниевым модулем 1,50; ◆ – шлаки с кремниевым модулем 2,00;
- ▲ – шлаки с кремниевым модулем 2,85; ■ – шлаки с кремниевым модулем 4,00 [38–40]

Fig. 1. Compositions of the studied synthetic slags:

- – slags with a silicon module of 1.50; ◆ – slags with a silicon module of 2.00;
- ▲ – slags with a silicon module of 2.85; ■ – slags with a silicon module of 4.00 [38–40]

Гранулометрический состав шлаков с кремниевым модулем 2,0 после охлаждения, %

Table 1. Granulometric composition of the slags with silicon module 2.0 after cooling, %

Состав шлака, %	Класс, мм	Скорость охлаждения, °С/мин			
		3	7	15	30
CaO = 51,5; SiO ₂ = 15,5; Al ₂ O ₃ = 33,0	+0,400	–	23,6	23,4	–
	0,400 – 0,315	–	13,1	8,6	–
	0,315 – 0,200	0,4	22,9	23,0	12,6
	0,200 – 0,160	1,4	8,8	7,7	13,3
	0,160 – 0,100	13,4	9,4	10,2	21,7
	0,100 – 0,063	30,8	9,0	10,4	21,1
	0,063 – 0,050	14,9	3,8	5,0	9,5
	–0,050	39,1	9,6	11,8	21,4
Итого		100,0	100,0	100,0	100,0

ной конструкции и нагревали до 1500 °С. Температуру плавления ферросплавов можно снижать путем ввода в них таких элементов, как алюминий [36, 37].

После выдержки при заданной температуре в течение 15 мин шлаки охлаждали со скоростями, указанными ниже, до температуры 900 °С, выдерживали 15 мин и затем извлекали из печи. Дальнейшее охлаждение шлака проводили на воздухе до комнатной температуры. Шлак после рассыпания подвергали ситовому анализу на наборе стандартных сит Retsch AS 200. На представленной тройной диаграмме состояния визуально наблюдаются области составов шлака, ограниченных линиями различных кремниевых модулей (Al₂O₃/SiO₂). Регулирование температуры в печи производилось автоматически с точностью ±5 °С.

47 – 60 % CaO, 30 – 40 % Al₂O₃, рассыпаются при охлаждении со скоростью 15 °С/мин в том же интервале температур, а шлаки, содержащие 14 % SiO₂, 51 – 60 % CaO – в интервале температур от ликвидуса до комнатной. Полностью рассыпавшиеся шлаки целиком проходят сквозь сито с размером ячейки 100 мкм.

Получение оптимальной фазы может быть достигнуто при избыточных количествах кремния в исходной смеси [44].

Установлено, что на рассыпаемость шлаков влияет температура выплавки и нижний предел охлаждения. В табл. 2 приведен гранулометрический состав шлака одного химического состава, нагретого до разных температур (1300, 1350, 1400 и 1600 °С), и охлажденного со скоростью 30 °С/мин до комнатной температуры.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 1 представлены результаты ситовых анализов охлажденных шлаков с кремниевым модулем 2,0. Для иллюстрации полученных закономерностей не случайно выбраны шлаки с кремниевым модулем 2,0.

В работе изучалось влияние различных факторов на рассыпаемость шлаков. Скорость охлаждения и химический (следовательно, и фазовый) состав шлаков оказывают существенное влияние на рассыпаемость. На диаграмме состояния системы CaO – SiO₂ – Al₂O₃ были найдены области составов шлаков, для самопроизвольного распада которых требуются определенные скорости охлаждения [41 – 43].

Скорость охлаждения 2 °С/мин от точки ликвидуса до 1000 °С обеспечивает рассыпаемость всех шлаков в области кристаллизации двухкальциевого силиката. Шлаки, содержащие 6 – 9 % SiO₂, 52 – 58 % CaO, 30 – 37 % Al₂O₃, при охлаждении со скоростью 7 °С/мин рассыпаются в интервале температур от ликвидуса до 1000 °С. Шлаки, содержащие 9 – 14 % SiO₂,

Таблица 2

Гранулометрический состав шлака, охлажденного с одинаковой скоростью, %

Table 2. Granulometric composition of the slag cooled at the same rate, %

Класс, мм	Температура нагрева, °С			
	1300	1350	1400	1600
+0,400	–	3,1	3,2	5,4
0,400 – 0,315	–	1,1	1,1	0,4
0,315 – 0,200	–	7,2	7,9	5,8
0,200 – 0,160	16,5	16,9	9,4	5,4
0,160 – 0,100	12,3	8,8	3,6	10,5
0,100 – 0,063	19,1	11,7	13,7	18,5
0,063 – 0,050	13,8	12,1	8,3	10,1
–0,050	38,3	39,0	52,5	43,8
Итого	100,0	100,0	100,0	100,0

В табл. 3 демонстрируется ситовой анализ шлака также одного состава, охлажденного от температуры 1500 °С до температур 700, 800, 900, 1000 и 1100 °С с постоянной регулируемой скоростью 10 °С/мин. Далее образцы извлекались из печи и дальнейшее охлаждение проводилось на воздухе с произвольной скоростью. Температурный градиент (верхнее и нижнее значение) оказывает влияние на гранулометрический состав и процесс последующего его рассыпания [45].

Гранулометрический состав шлака, охлажденного с одинаковой скоростью от 1500 °С до указанных температур, %

Table 3. Granulometric composition of the slag cooled at the same rate from 1500 °С to the specified temperatures, %

Класс, мм	Температура охлаждения, °С				
	700	800	900	1000	1100
+0,400	–	–	–	–	36,4
0,400 – 0,315	–	–	–	–	1,1
0,315 – 0,200	–	–	0,9	0,6	3,6
0,200 – 0,160	–	–	1,3	2,4	2,7
0,160 – 0,100	0,9	0,8	8,9	11,4	9,5
0,100 – 0,063	15,1	15,4	23,6	23,5	11,0
0,063 – 0,050	19,0	18,5	16,3	15,4	8,2
–0,050	65,0	65,8	48,9	46,8	27,9
Итого	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гранулометрический и химический составы шлаков указаны на рис. 2.

Проведенные исследования показали, что рассыпаемость шлаков повышается по мере продвижения от границ области двухкальциевого силиката к центру. Состав шлаков близок к составу точек, расположенных в области, ограниченной с одной стороны линиями $2CaO \cdot SiO_2 - 2CaO \cdot Al_2O_3$ и $2CaO \cdot SiO_2 - 12CaO \cdot 7Al_2O_3$,

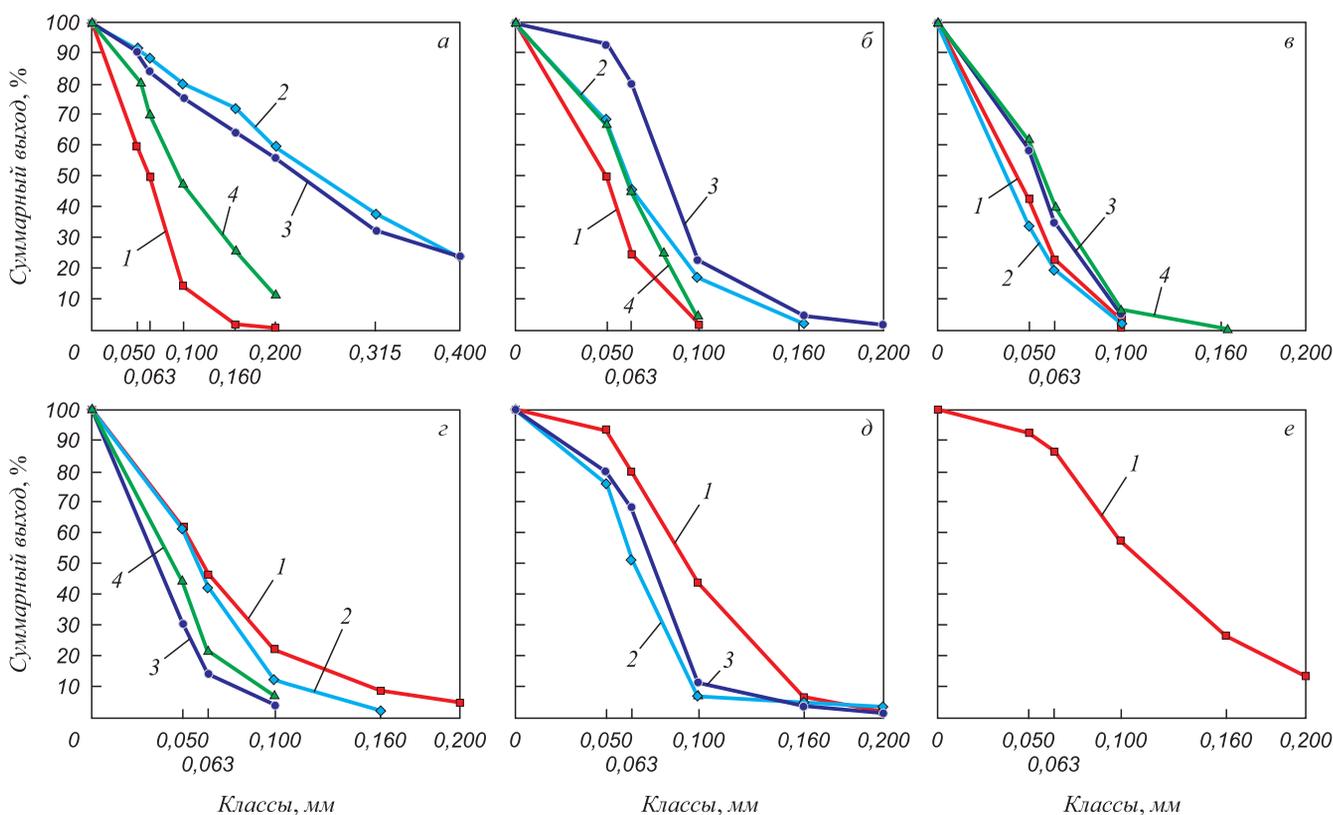


Рис. 2. Гранулометрический состав шлака, содержащего, %:

a – 51,5 CaO, 15,5 SiO₂, 33,0 Al₂O₃; б – 53,4 CaO, 14,1 SiO₂, 32,5 Al₂O₃; в – 56,5 CaO, 14,2 SiO₂, 29,3 Al₂O₃;
 г – 54,4 CaO, 14,6 SiO₂, 30,9 Al₂O₃; д – 60,5 CaO, 13,2 SiO₂, 26,3 Al₂O₃; е – 62,6 CaO, 12,0 SiO₂, 25,4 Al₂O₃;
 1 – шлаки с кремниевым модулем 1,50; 2 – шлаки с кремниевым модулем 2,00; 3 – шлаки с кремниевым модулем 2,85;
 4 – шлаки с кремниевым модулем 4,00 [36 – 38]

Fig. 2. Granulometric composition of slag containing, %:

a – 51.5 CaO, 15.5 SiO₂, 33.0 Al₂O₃; б – 53.4 CaO, 14.1 SiO₂, 32.5 Al₂O₃; в – 56.5 CaO, 14.2 SiO₂, 29.3 Al₂O₃;
 г – 54.4 CaO, 14.6 SiO₂, 30.9 Al₂O₃; д – 60.5 CaO, 13.2 SiO₂, 26.3 Al₂O₃; е – 62.6 CaO, 12.0 SiO₂, 25.4 Al₂O₃;
 1 – slags with silicon module 1.50; 2 – slags with silicon module 2.00; 3 – slags with silicon module 2.85;
 4 – slags with silicon module 4.00 [36 – 38]

и с другой стороны линиями кремниевого модуля не выше 2,85 – 3,00. Выявлено, что гранулометрический состав шлака почти не зависит от скорости его охлаждения [46].

По мере приближения к границам области двухкальциевого силиката, скорость охлаждения начинает существенно сказываться на гранулометрическом составе шлаков, что хорошо прослеживается на рис. 2.

Чем меньше скорость охлаждения шлаков, тем более точно выполняются условия равновесия кристаллизации. Ожидалось, что рассыпаемость шлака будет улучшаться с уменьшением скорости охлаждения.

Шлаки, охлажденные со скоростью 30 °С/мин, после рассыпания имеют гранулометрический состав мельче, чем шлаки того же химического состава, охлажденные со скоростью 7 и 15 °С/мин. Это явление, вероятно, вызывается образованием большего числа зародышей кристаллов при быстром охлаждении [47].

Следует также отметить, что рассыпаемость шлаков ухудшается с ростом кремниевого модуля. В проведенных авторами опытах рассыпался только один шлак с

кремниевым модулем 4,0 и только при скорости охлаждения 3 °С/мин.

Выводы

Скорость охлаждения и химический состав шлаков существенно влияют на их рассыпаемость. Она повышается с уменьшением скорости охлаждения и по мере удаления составов шлаков от границ области первичной кристаллизации двухкальциевого силиката. Однако с увеличением кремниевого модуля рассыпаемость снижается.

На гранулометрический состав рассыпавшихся шлаков большее влияние оказывает химический состав, чем скорость их охлаждения.

Исходя из полученных данных, с технологической точки зрения наиболее перспективными являются шлаки с кремниевым модулем не выше 2,85 – 3,00, состав которых находится внутри или близко к фазовому треугольнику, ограниченному линиями $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2 - 2\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Баженов И.Н., Басов О.О. Метод индукционного контроля массовой доли железа в магнетитовой руде // Записки Горного института. 2018. Т. 230. С. 123–130. <https://doi.org/10.25515/pmi.2018.2.123>
2. Сизяков В.М., Бричкин В.Н. О роли гидрокарбоалюминатов кальция в усовершенствовании технологии комплексной переработки нефелинов // Записки Горного института. 2018. Т. 231. С. 292–298. <https://doi.org/10.25515/PMI.2018.3.292>
3. Хатъков В.Ю., Боярко Г.Ю. Административные методы управления импортозамещения дефицитных видов минерального сырья // Записки Горного института. 2018. Т. 234. С. 683–692. <https://doi.org/10.31897/pmi.2018.6.683>
4. Зиновеев Д.В., Грудинский П.И., Дюбанов В.Г., Коваленко Л.В., Леонтьев Л.И. Обзор мировой практики переработки красных шламов. Часть 1. Пирометаллургические способы // Известия вузов. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 11. С. 843–858. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-11-843-858>
5. Волков А.И., Стулов П.Е., Леонтьев Л.И., Углов В.А. Анализ использования редкоземельных металлов в черной металлургии России и мира // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 6. С. 405–418. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-6-405-418>
6. Zubkova O., Alexeev A., Polyanskiy A., Karapetyan K., Kononchuk O., Reinmöller M. Complex processing of saponite waste from a diamond-mining enterprise // Applied Sciences. 2021. Vol. 11. No. 14. Article 6615. <https://doi.org/10.3390/app11146615>
7. Булаев А.Г., Меламуд В.С., Бодуэн А.Я. Высокотемпературное выщелачивание меди и цинка из некондиционного концентрата с высоким содержанием мышьяка // Международный научно-исследовательский журнал. 2018. № 12 (78). Часть 1. С. 72–76. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.012>
8. Горланов Е.С., Бажин В.Ю., Федоров С.Н. Карботермический синтез диборида титана: апгрейд // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. 2018. № 11 (2). С. 156–166. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0065>
9. Баринкова А.А., Пириайнен В.Ю., Баринков В.М. Новый композиционный материал с нейтрализованным красным шламом // Информационно-технологический вестник. 2021. № 2(28). С. 156–169. <https://doi.org/10.21499/2409-1650-2021-28-2-156-169>
1. Bazhenov I.N., Basov O.O. Method of induction control of iron weight fraction in magnetite ore. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 230, pp. 123–130. (In Russ.). <https://doi.org/10.25515/pmi.2018.2.123>
2. Sizyakov V.M., Brichkin V.N. About the role of hydrofated calcium carboaluminates in improving the technology of complex processing of nephelines. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 231, pp. 292–298. (In Russ.). <https://doi.org/10.25515/PMI.2018.3.292>
3. Khat'kov V.Yu., Boyarko G.Yu. Administrative methods of import substitution management of deficient types of mineral raw materials. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 234, pp. 683–692. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/pmi.2018.6.683>
4. Zinoveev D.V., Grudinskii P.I., Dyubanov V.G., Kovalenko L.V., Leont'ev L.I. Global recycling experience of red mud – a review. Part I: Pyrometallurgical methods. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018, vol. 61, no. 11, pp. 843–858. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-11-843-858>
5. Volkov A.I., Stulov P.E., Leont'ev L.I., Uglov V.A. Analysis of the use of rare earth metals in ferrous metallurgy of Russia and world. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 6, pp. 405–418. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-6-405-418>
6. Zubkova O., Alexeev A., Polyanskiy A., Karapetyan K., Kononchuk O., Reinmöller M. Complex processing of saponite waste from a diamond-mining enterprise. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 14, article 6615. <https://doi.org/10.3390/app11146615>
7. Bulaev A.G., Melamud V.S., Boduen A.Ya. High-temperature biox of copper and zinc from non-standard concentrate with high content of arsenic. *International Research Journal*. 2018, no. 12 (78), part 1, pp. 72–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.012>
8. Gorlanov E.S., Bazhin V.Yu., Fedorov S.N. Carbothermic synthesis of titanium diboride: Upgrade. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2018, no. 11 (2), pp. 156–166. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0065>
9. Barinkova A.A., Piirainen V.Yu., Barinkov V.M. New composite material with neutralized red mud. *Informatsionno-technologicheskii vestnik*. 2021, no. 2(28), pp. 156–169. (In Russ.). <https://doi.org/10.21499/2409-1650-2021-28-2-156-169>

10. Гурьев А.А. Устойчивое развитие рудно-сырьевой базы и обогащительных мощностей АО «Апатит» на основе лучших инженерных решений // Записки Горного института. 2017. Т. 228. С. 662–673. <https://doi.org/10.25515/PMI.2017.6.662>
11. Бояринцев А.В., Степанов С.И., Хтет Ёе Аунг, Маунг Маунг Аунг. Гидролитическое осаждение алюминия и скандия из щелочно-карбонатных растворов при переработке красных шламов // Успехи в химии и химической технологии. 2019. Т. 33. № 1 (211). С. 54–56.
12. Akcil A., Akhmadiyeva N., Abdulvaliyev R., Abhilash, Meshram P. Overview on extraction and separation of rare earth elements from red mud: Focus on scandium // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2018. Vol. 39. No. 3. P. 145–151. <https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1288116>
13. Капустина Г.Г., Римлянд В.И. Исследование воздействия непрерывного лазерного излучения на красный шлам // Вести научных достижений. Естественные и технические науки. 2020. № 1. С. 6–9.
14. Газалева Г.И., Мамонов С.В., Братыгин Е.В., Ключников А.М. Проблемы и инновационные решения в обогащении техногенного сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 1. С. 257–272.
15. Zhang J., Li P., Liang M., Jiang H., Yao Z., Zhang X., Yu S. Utilization of red mud as an alternative mineral filler in asphalt mastics to replace natural limestone powder // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 237. Article 117821. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117821>
16. Бальков А.А., Левенец О.О., Хайнасова Т.С. Проточный биореактор для исследования бактериально-химического выщелачивания сульфидных медно-никелевых руд и концентратов // Записки Горного института. 2018. Т. 232. С. 383–387. <https://doi.org/10.31897/pmi.2018.4.383>
17. Alkan G., Xakalash B., Yagmurlu B., Kaussen F., Friedrich B. Conditioning of red mud for subsequent titanium and scandium recovery – a conceptual design study // World of Metallurgy – ERZMETAL. 2017. Vol. 70. No. 2. P. 84–91.
18. Рогачев М.К., Александров А.Н. Обоснование комплексной технологии предупреждения образования асфальтсмолопарафиновых отложений при добыче высокопарафинистой нефти погружными электроцентробежными насосами из многопластовых залежей // Записки Горного института. 2021. Т. 21. № 4. С. 596–605. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.13>
19. Archambo M., Kawatra S.K. Red mud: Fundamentals and new avenues for utilization // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2021. Vol. 42. No. 7. P. 427–450. <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1781109>
20. Никифоров А.Г., Ручьев А.М. Ресурсы граната и редких металлов на рудопроявлении «Высота-181» (Северная Карелия) // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2019. № 10. С. 62–70. <http://dx.doi.org/10.17076/geo1104>
21. Smyshlyaeva K.I., Rudko V.A., Povarov V.G., Shaidulina A.A., Efimov I., Gabdulkhakov R.R., Pyagay I.N., Speight J.G. Influence of asphaltenes on the low-sulphur residual marine fuels' stability // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9. No. 11. Article 1235. <https://doi.org/10.3390/jmse9111235>
22. Рис А.Д., Сундунов А.В., Дубовиков О.А. Поведение бокситовых концентратов на стадии выщелачивания по способу Байера // iPolytech Journal. 2019. Т. 23. № 2. С. 395–403. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-395-403>
23. Артеменков А.Г., Бычяня Ю.Г., Герасимова Л.Г., Николаев А.И. Сернокислотное разложение перовскита в присутствии добавок, повышающих устойчивость титана (IV) в жидкой фазе // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9. № 2–1. С. 121–124. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.121-124>
24. Geng J., Zhou M., Li Y., Chen Y., Han Y., Wan S., Zhou X., Hou H. Comparison of red mud and coal gangue blended geopolymers synthesized through thermal activation and mechanical grinding pre-activation // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 153. P. 185–192. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.045>
10. Gur'ev A.A. Sustainable development of crude ore resources and beneficiation facilities of JSC "Apatit" based on best engineering solutions. *Journal of Mining Institute*. 2017, vol. 228, pp. 662–673. (In Russ.). <https://doi.org/10.25515/PMI.2017.6.662>
11. Boyarintsev A.V., Stepanov S.I., Htet Ye Aung, Maung Maung Aung. Hydrolytic sedimentation of aluminium and scandium from alkaline-carbonate solutions after leaching of red mud. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2019, vol. 33, no. 1 (211), pp. 54–56. (In Russ.).
12. Akcil A., Akhmadiyeva N., Abdulvaliyev R., Abhilash, Meshram P. Overview on extraction and separation of rare earth elements from red mud: Focus on scandium. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2018, vol. 39, no. 3, pp. 145–151. <https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1288116>
13. Kapustina G.G., Rimlyand V.I. Research of the influence of continuous laser radiation on red mud. *Vesti nauchnykh dostizhenii. Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2020, no. 1, pp. 6–9. (In Russ.).
14. Gazaleeva G.I., Mamonov S.V., Bratygin E.V., Klyushnikov A.M. Problems and innovation solution in technogenic raw material beneficiation. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2017, no. 1, pp. 257–272. (In Russ.).
15. Zhang J., Li P., Liang M., Jiang H., Yao Z., Zhang X., Yu S. Utilization of red mud as an alternative mineral filler in asphalt mastics to replace natural limestone powder. *Construction and Building Materials*. 2020, vol. 237, article 117821. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117821>
16. Balykov A.A., Levenets O.O., Khainasova T.S. Flow bioreactor for studying bacterial-chemical leaching of sulfide copper-nickel ores and concentrates. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 232, pp. 383–387. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/pmi.2018.4.383>
17. Alkan G., Xakalash B., Yagmurlu B., Kaussen F., Friedrich B. Conditioning of red mud for subsequent titanium and scandium recovery – A conceptual design study. *World of Metallurgy – ERZMETAL*. 2017, vol. 70, no. 2, pp. 84–91.
18. Rogachev M.K., Aleksandrov A.N. Justification of a comprehensive technology for preventing the formation of asphalt-resin-paraffin deposits during the production of highlyparaffinic oil by electric submersible pumps from multiformation deposits. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 250, pp. 596–605. (In Russ.). <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.4.13>
19. Archambo M., Kawatra S.K. Red mud: Fundamentals and new avenues for utilization. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2021, vol. 42, no. 7, pp. 427–450. <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1781109>
20. Nikiforov A.G., Ruchyov A.M. Garnet and rare-metals resources of the Vysota-181 ore occurrence, North Karelia. *Transactions of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2019, no. 10, pp. 62–70. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.17076/geo1104>
21. Smyshlyaeva K.I., Rudko V.A., Povarov V.G., Shaidulina A.A., Efimov I., Gabdulkhakov R.R., Pyagay I.N., Speight J.G. Influence of asphaltenes on the low-sulphur residual marine fuels' stability. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021, vol. 9, no. 11, article 1235. <https://doi.org/10.3390/jmse9111235>
22. Ris A.D., Sundurov A.V., Dubovikov O.A. Bauxite concentrate behaviour at the leaching stage in the Bayer process. *iPolytech Journal*. 2019, vol. 23, no. 2, pp. 395–403. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-2-395-403>
23. Artemenkov A.G., Bychenya Yu.G., Gerasimova L.G., Nikolaev A.I. Sulfuric acid decomposition of perovskite in the presence of additives increasing the stability of titanium (IV) in the liquid phase. *Transactions of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2018, vol. 9, no. 2–1, pp. 121–124. (In Russ.). <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.1.121-124>
24. Geng J., Zhou M., Li Y., Chen Y., Han Y., Wan S., Zhou X., Hou H. Comparison of red mud and coal gangue blended geopolymers synthesized through thermal activation and mechanical grinding pre-activation. *Construction and Building Materials*. 2017, vol. 153, pp. 185–192. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.045>

25. Жучков В.И., Леонтьев Л.И., Заякин О.В. Использование российского рудного сырья для производства ферросплавов // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 3–4. С. 211–217. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-3-4-211-217>
26. Леонтьев Л.И., Цуканов В.В., Смирнова Д.Л., Роль Д.К. Чернова в создании и развитии учения о современной металлургии и металловедении. Часть 2. Научно-практическое подтверждение идей Д.К. Чернова // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 11–12. С. 873–877. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-11-12-873-877>
27. Yang Z., Mocadlo R., Zhao M., Sisson R.D., Tao M., Liang J. Preparation of a geopolymer from red mud slurry and class F fly ash and its behavior at elevated temperatures // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 221. P. 308–317. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.034>
28. Agrawal S., Dhawan N. Investigation of mechanical and thermal activation on metal extraction from red mud // Sustainable Materials and Technologies. 2021. Vol. 27. Article e00246. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00246>
29. Jafarova S.T., Gahramanova E.B., Agayev A.I., Ahmadov M.M. Development and study of properties of contact masses on the basis of red mud // Azerbaijan Chemical Journal. 2017. No. 3. С. 28–33.
30. Alekseev K., Mymrin V., Avanci M.A., Klitzke W., Magalhães W.L.E., Silva P.R., Catai R.E., Silva D.A., Ferraz F.A. Environmentally clean construction materials from hazardous bauxite waste red mud and spent foundry sand // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 229. Article 116860. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116860>
31. Li Z., Zhang J., Li S., Lin C., Gao Y., Liu C. Feasibility of preparing red mud-based cementitious materials: Synergistic utilization of industrial solid waste, waste heat, and tail gas // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 285. Article 124896. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124896>
32. Wang L., Chen L., Tsang D.C.W., Zhou Y., Rinklebe J., Song H., Kwon E.E., Baek K., Sik Ok Y. Mechanistic insights into red mud, blast furnace slag, or metakaolin-assisted stabilization/solidification of arsenic-contaminated sediment // Environment International. 2019. Vol. 133. Part B. Article 105247. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105247>
33. Валеев Д.В., Зиновеев Д.В., Варнавская А.Д. Восстановительная плавка обесщелоченного красного шлака с получением металла и алюмосодержащего шлака // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. Т. 10. № 1 (3). С. 44–51. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.1.44-51>
34. Лебедев А.Б., Утков В.А., Бажин В.Ю. Применение красного шлака в качестве модификатора при грануляции металлургических шлаков // iPolytech Journal. 2019. Т. 23. № 1 (144). С. 158–168. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-158-168>
35. Krivenko P., Petropavlovskiy O., Kovalchuk O., Lapovska S., Pasko A. Design of the composition of alkali activated portland cement using mineral additives of technogenic origin // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Т. 4. No. 6 (94). P. 6–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140324>
36. Agrawal S., Rayapudi V., Dhawan N. Extraction of iron values from red mud // Materials Today: Proceedings. 2018. Vol. 5. No. 9. Part 1. P. 17064–17072. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.113>
37. Agrawal S., Dhawan N. Evaluation of red mud as a polymetallic source – A review // Minerals Engineering. 2021. Vol. 171. Article 107084. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107084>
38. Леонтьев Л.И., Жучков В.И., Заякин О.В., Сычев А.В., Михайлова Л.Ю. Перспективы получения и применения комплексных ниобиевых ферросплавов // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 1. С. 10–20. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-10-20>
39. Александров А.А., Дашевский В.Я., Леонтьев Л.И. Растворимость кислорода в расплавах системы Ni – Co при комплексном раскислении алюминием и кремнием // Известия вузов. Черная металлургия. 2019. Т. 62. № 11. С. 870–878. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-11-870-878>
25. Zhuchkov V.I., Leont'ev L.I., Zayakin O.V. Application of Russian ore raw materials to ferroalloys production. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 3–4, pp. 211–217. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-3-4-211-217>
26. Leont'ev L.I., Tsukanov V.V., Smirnova D.L. D.K. Chernov's role in creating and developing the doctrine of modern metallurgy and metal science. Part 2. Scientific and practical confirmation of D.K. Chernov's ideas. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 11–12, pp. 873–877. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-11-12-873-877>
27. Yang Z., Mocadlo R., Zhao M., Sisson R.D., Tao M., Liang J. Preparation of a geopolymer from red mud slurry and class F fly ash and its behavior at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 2019, vol. 221, pp. 308–317. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.034>
28. Agrawal S., Dhawan N. Investigation of mechanical and thermal activation on metal extraction from red mud. *Sustainable Materials and Technologies*. 2021, vol. 27, article e00246. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00246>
29. Jafarova S.T., Gahramanova E.B., Agayev A.I., Ahmadov M.M. Development and study of properties of contact masses on the basis of red mud. *Azerbaijan Chemical Journal*. 2017, no. 3, pp. 28–33.
30. Alekseev K., Mymrin V., Avanci M.A., Klitzke W., Magalhães W.L.E., Silva P.R., Catai R.E., Silva D.A., Ferraz F.A. Environmentally clean construction materials from hazardous bauxite waste red mud and spent foundry sand. *Construction and Building Materials*. 2019, vol. 229, article 116860. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116860>
31. Li Z., Zhang J., Li S., Lin C., Gao Y., Liu C. Feasibility of preparing red mud-based cementitious materials: Synergistic utilization of industrial solid waste, waste heat, and tail gas. *Journal of Cleaner Production*. 2021, vol. 285, article 124896. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124896>
32. Wang L., Chen L., Tsang D.C.W., Zhou Y., Rinklebe J., Song H., Kwon E.E., Baek K., Sik Ok Y. Mechanistic insights into red mud, blast furnace slag, or metakaolin-assisted stabilization/solidification of arsenic-contaminated sediment. *Environment International*. 2019, vol. 133, part B, article 105247. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105247>
33. Valeev D.V., Zinoveev D.V., Varnavskaya A.D. Reductive smelting of neutralized red mud for iron and aluminum-containing slag production. *Transactions of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2019, vol. 10, no. 1 (3), pp. 44–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.1.44-51>
34. Lebedev A.B., Utkov V.A., Bazhin V.Yu. Use of red mud as a modifier in granulation of metallurgical slags. *iPolytech Journal*. 2019, vol. 23, no. 1, pp. 158–168. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2019-1-158-168>
35. Krivenko P., Petropavlovskiy O., Kovalchuk O., Lapovska S., Pasko A. Design of the composition of alkali activated portland cement using mineral additives of technogenic origin. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, vol. 4, no. 6 (94), pp. 6–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140324>
36. Agrawal S., Rayapudi V., Dhawan N. Extraction of iron values from red mud. *Materials Today: Proceedings*. 2018, vol. 5, no. 9, part 1, pp. 17064–17072. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.113>
37. Agrawal S., Dhawan N. Evaluation of red mud as a polymetallic source – A review. *Minerals Engineering*. 2021, vol. 171, article 107084. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107084>
38. Leont'ev L.I., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Sychev A.V., Mikhailova L.Yu. Potential for obtaining and applying complex niobium ferroalloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 1, pp. 10–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-10-20>
39. Alexandrov A.A., Dashevskii V.Ya., Leont'ev L.I. Oxygen solubility in melts of Ni – Co system at complex deoxidation by aluminum and silicon. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 11, pp. 870–878. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-11-870-878>

40. Hoc Thang N., Trung Kien P., Mohd Mustafa Al Bakri A. Light-weight heat resistant geopolymer-based materials synthesized from red mud and rice husk ash using sodium silicate solution as alkaline activator // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 97. No. 1. Article 01119. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179701119>
41. Lis J., Chlubny L., Witulska K., Borowiak P., Kozak K., Misztal A., Czajkowska O. SHS of Ti_3SiC_2 -based materials in the Ti–Si–C system: Impact of silicon excess // International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. 2019. Vol. 28. P. 262–265. <https://doi.org/10.3103/S1061386219040083>
42. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Васильева А.Д. Обоснование устойчивости внешних отвалов Кузбасса и мониторинг их состояния // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 4. С. 109–120. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-109-120>
43. Podoprigora D., Raupov I. Research of the influence of polymeric drilling mud on the filtration-capacitive properties of polymictic sandstones // Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved). 2018. Vol. 63. P. 537–546.
44. Sultanbekov R., Beloglazov I., Islamov S., Ong M. Exploring of the incompatibility of marine residual fuel: A case study using machine learning methods // Energies. 2021. Vol. 14. No. 24. Article 8422. <https://doi.org/10.3390/en14248422>
45. Shaidulina A.A., Konoplin R.R., Artyushevskiy D.I., Gorshneva E.A., Sutyaginsky M.A. Production of amorphous silicon dioxide derived from aluminum fluoride industrial waste and consideration of the possibility of its use as $Al_2O_3-SiO_2$ catalyst supports // Catalysts. 2022. Vol. 12. No. 2. P. 162. <https://doi.org/10.3390/catal12020162>
46. Mukiza E., Liu X., Zhang L., Zhang N. Preparation and characterization of a red mud-based road base material: Strength formation mechanism and leaching characteristics // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 220. P. 297–307. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.027>
47. Pereira Babiska M., Fonseca Amaral L., da Silva Ribeiro L., Fontes Vieira C.M., Soares do Prado U., Castoldi Borlini Gadioli M., Souza Oliveira M., Santos da Luz F., Neves Monteiro S., da Costa Garcia Filho F. Evaluation and application of sintered red mud and its incorporated clay ceramics as materials for building construction // Journal of Materials Research and Technology. 2020. Vol. 9. No. 2. P. 2186–2195. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.049>
40. Hoc Thang N., Trung Kien P., Mohd Mustafa Al Bakri A. Light-weight heat resistant geopolymer-based materials synthesized from red mud and rice husk ash using sodium silicate solution as alkaline activator. MATEC Web of Conferences. 2017, vol. 97, no. 1, article 01119. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179701119>
41. Lis J., Chlubny L., Witulska K., Borowiak P., Kozak K., Misztal A., Czajkowska O. SHS of Ti_3SiC_2 -based materials in the Ti–Si–C system: Impact of silicon excess. International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. 2019, vol. 28, pp. 262–265. <https://doi.org/10.3103/S1061386219040083>
42. Kutepov Yu.I., Kutepova N.A., Vasil'eva A.D. External dump stability substantiation and monitoring in Kuzbass. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'. 2019, no. 4, pp. 109–120. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-109-120>
43. Podoprigora D., Raupov I. Research of the influence of polymeric drilling mud on the filtration-capacitive properties of polymictic sandstones. Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved). 2018, vol. 63, pp. 537–546.
44. Sultanbekov R., Beloglazov I., Islamov S., Ong M. Exploring of the incompatibility of marine residual fuel: A case study using machine learning methods. Energies. 2021, vol. 14, no. 24, article 8422. <https://doi.org/10.3390/en14248422>
45. Shaidulina A.A., Konoplin R.R., Artyushevskiy D.I., Gorshneva E.A., Sutyaginsky M.A. Production of amorphous silicon dioxide derived from aluminum fluoride industrial waste and consideration of the possibility of its use as $Al_2O_3-SiO_2$ catalyst supports. Catalysts. 2022, vol. 12, no. 2, pp. 162. <https://doi.org/10.3390/catal12020162>
46. Mukiza E., Liu X., Zhang L., Zhang N. Preparation and characterization of a red mud-based road base material: Strength formation mechanism and leaching characteristics. Construction and Building Materials. 2019, vol. 220, pp. 297–307. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.027>
47. Pereira Babiska M., Fonseca Amaral L., da Silva Ribeiro L., Fontes Vieira C.M., Soares do Prado U., Castoldi Borlini Gadioli M., Souza Oliveira M., Santos da Luz F., Neves Monteiro S., da Costa Garcia Filho F. Evaluation and application of sintered red mud and its incorporated clay ceramics as materials for building construction. Journal of Materials Research and Technology. 2020, vol. 9, no. 2, pp. 2186–2195. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.049>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрей Борисович Лебедев, к.т.н., сотрудник научного центра «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов», Санкт-Петербургский горный университет
ORCID: 0000-0002-8081-9301
E-mail: 2799957@mail.ru

Вера Сергеевна Шуйская, лаборант-исследователь научного центра «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов», Санкт-Петербургский горный университет
ORCID: 0000-0003-2805-0010
E-mail: veraizabelshu@gmail.com

Andrei B. Lebedev, Cand. Sci. (Eng.), Research Associate of the Scientific Center “Problems of Processing of Mineral and Technogenic Resources”, St. Petersburg Mining University
ORCID: 0000-0002-8081-9301
E-mail: 2799957@mail.ru

Vera S. Shuiskaya, Research Laboratory Assistant of the Scientific Center “Problems of Processing of Mineral and Technogenic Resources”, St. Petersburg Mining University
ORCID: 0000-0003-2805-0010
E-mail: veraizabelshu@gmail.com

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

А. Б. Лебедев – научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.
В. С. Шуйская – формирование основной концепции, цели и задачи исследования; проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

A. B. Lebedev – scientific guidance, analysis of the research results, revision of the text, correction of conclusions.
V. S. Shuiskaya – formation of the basic concept, goals and objectives of the study; calculations, preparation of the text, formation of conclusions.

Поступила в редакцию 01.12.2021
 После доработки 12.05.2022
 Принята к публикации 26.05.2022

Received 01.12.2021
 Revised 12.05.2022
 Accepted 26.05.2022

*Оригинальная статья*

УДК 621.746.01

DOI 10.17073/0368-0797-2022-11-814-823

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2436>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА И СКОРОСТИ РАЗЛИВКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ОСЕВОЙ ЗОНЫ КРУПНОГО СЛИТКА

С. Б. Гаманюк, Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан,
М. В. Кириличев, М. С. Никитин, Д. Н. Гурулев

Волгоградский государственный технический университет (Россия, 400005, Волгоград, пр. им. В.И. Ленина, 28)

Аннотация. Работа посвящена изучению влияния способа и скорости разливки расплава на процесс затвердевания и особенности формирования осевой зоны крупного слитка. Исследования проводились с использованием метода физического моделирования, для проведения которого разработана и изготовлена лабораторная установка (изложница-кристаллизатор), позволяющая визуально изучать процессы, происходящие при затвердевании и структурообразовании модельных слитков. В качестве моделирующего раствора использовали натрий серноватистоокислый (кристаллический гипосульфит) – $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Соответствие процессов, происходящих на модели и в реальных условиях отливки промышленных слитков, оценивалось с помощью критериев подобия. Они были получены на основе теории размерностей, исходя из анализа физико-химических процессов, происходящих при разливке и кристаллизации слитка. Разливку расплава в изложницу-кристаллизатор выполняли двумя способами: сверху и сифоном. При моделировании слитков геометрические и технологические параметры отливки оставались неизменными, изменялась только скорость разливки расплава. Определялась протяженность и средняя ширина осевой зоны модельного слитка. С целью оценки изменения поля температур при разливке и кристаллизации слитка в течение всего времени затвердевания проводили термометрирование поверхности модели изложницы. Обработка тепловизионных изображений позволила получить изменение температуры поверхности модели изложницы по высоте слитков, отлитых с различными скоростями разливки расплава сверху. Анализ результатов исследований показал, что изменение скорости разливки расплава оказывает существенное влияние на протяженность осевой зоны. Установлено, что уменьшение скорости разливки расплава приводит к увеличению направленности кристаллизации и улучшению структуры осевой зоны слитка.

Ключевые слова: физическое моделирование, разливка сифоном, разливка сверху, изложница-кристаллизатор, скорость разливки расплава, процесс затвердевания, осевая зона, крупный кузнечный слиток

Для цитирования: Гаманюк С.Б., Руцкий Д.В., Зюбан Н.А., Кириличев М.В., Никитин М.С., Гурулев Д.Н. Использование физического моделирования для оценки влияния способа и скорости разливки на формирование осевой зоны крупного слитка // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 11. С. 814–823. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-814-823>

Original article

APPLICATION OF PHYSICAL SIMULATION TO EVALUATE THE IMPACT OF TEEMING METHOD AND RATE ON AXIAL ZONE FORMATION OF LARGE INGOTS

S. B. Gamanyuk, D. V. Rutsikii, N. A. Zyuban,
M. V. Kirilichev, M. S. Nikitin, D. N. Gurulev

Volgograd State Technical University (28 Lenina Ave., Volgograd 400005, Russian Federation)

Abstract. The article presents the results of evaluation of the impact of teeming method and rate on solidification and formation of the axial zone of large ingots. The research is based on a physical simulation. With this aim a laboratory-scale plant (a crystallization mould) was designed and built which enabled to visualize and monitor solidification and structural formation of the model ingots. Sodium thiosulphate (crystal hyposulphite) – $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ was used as a modeling solution. Matching of the processes in the model and in real industrial conditions of ingot teeming was assessed with similarity criteria obtained on the basis of the dimension theory with consideration of the physical and chemical processes in the ingot during its teeming and crystallization. Two methods – downhill casting and uphill casting – were used to teem the melt into the mould. During teeming the geometry and technological parameters of the model ingots remained unchanged while the teeming rate was altered. Length and medium width of the model ingot axial zone were measured. The thermal profiling of the surface of the mould model was monitored over the entire period

of solidification to evaluate the thermal field alteration while the ingot was teemed and crystallized. Thermal imaging processing made it possible to observe temperature changes of the surface of the model mould from top to bottom for downhill cast ingots teemed at different rates. The results obtained demonstrate that teeming rate has a noticeable impact on the axial zone length. It was established that a decreased rate leads to an increased directionality of crystallization and improvement of the ingot axial zone structure.

Keywords: physical simulation, uphill casting, downhill casting, crystallization mould, teeming rate, solidification, axial zone, large forging ingot

For citation: Gamanyuk S.B., Rutsii D.V., Zyuban N.A., Kirilichev M.V., Nikitin M.S., Gurulev D.N. Application of physical simulation to evaluate the impact of teeming method and rate on axial zone formation of large ingots. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 11, pp. 814–823. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-814-823>

ВВЕДЕНИЕ

Затвердевание больших масс металла всегда сопровождается образованием значительного количества внутренних дефектов, особенно в осевой зоне. Особенности образования и развития осевой зоны определяются разными факторами, и этому процессу посвящено много работ. Однако и в настоящее время решение этой проблемы представляет сложную научно-техническую задачу в связи с многообразием физико-химических и тепловых процессов, протекающих при кристаллизации крупного слитка [1 – 3].

Для получения относительно плотной осевой зоны крупные слитки отливают с большим объемом избыточной части, достигающей до 25 %, что способствует снижению осевой пористости и рыхлости в получаемых поковках [4, 5].

Установленное на сегодняшний день является преобладающим влияние на развитие осевой зоны геометрических параметров слитка – отношения H/D , конусности, и, соответственно, типа слитка (укороченный, нормальный, удлиненный) [6 – 12].

Поскольку процесс образования осевой пористости неразрывно связан с усадочными явлениями, которые, в свою очередь, определяются температурными условиями и теплофизическими процессами при разливке и кристаллизации слитка, то существенное влияние на формирование осевых дефектов слитка должны оказывать способ и скорость разливки металла [13 – 15].

Повышенная скорость разливки приводит к увеличению количества продольных трещин на поверхности слитка и появлению заворотов корочки. Разливка с недостаточной скоростью ведет к усиленному образованию и заворотам корочки, особенно при разливке стали сифоном. Скорость разливки чаще всего характеризуют скоростью подъема стали в изложнице, которая находится в пределах 0,15 – 5,00 м/мин. Ее регулируют изменением диаметра разливочного стакана, а также частичным перекрытием вытекающей из стакана струи с помощью стопора или шибера [2].

При разливке слитков сифонным способом одной из важных особенностей является скорость заполнения изложницы. Большие кузнечные слитки обычно заполняют с меньшей скоростью. Это необходимо для гарантированного формирования твердой корочки надлежащей толщины для устранения или минимизации образования продольных трещин. Уменьшение ско-

рости разливки сопровождается увеличением продолжительности наполнения изложниц, вследствие чего усиливается охлаждение открытой поверхности металла, поднимающегося в изложнице при разливке. Это приводит к образованию на ней твердой окисленной «корочки» и к ее заворотам [16]. Для предотвращения образования такого типа дефектов применяют защиту зеркала металла от вторичного окисления, используют теплоизолирующие и шлакообразующие смеси, поддерживают необходимую температуру разливки.

Для изучения особенностей структурообразования и развития внутренних дефектов в крупных кузнечных слитках пользуются методами компьютерного [8, 17 – 21] и физического моделирования [22 – 26]. Физическое моделирование позволяет наглядно определить кинетику процесса продвижения твердой и твердожидкой фаз при одновременном протекании процессов конвективного перемешивания металлического расплава, развития внутренних дефектов. Большая часть работ, в которых проводится моделирование, посвящена влиянию геометрических параметров слитков [5, 7, 8, 16, 21, 23], а также внешнего воздействия (электромагнитное перемешивание, вибровоздействие и т. д.) на затвердевающий расплав [22, 27, 28]. При этом отсутствуют работы, в которых проводится физическое моделирование влияния скоростных режимов разливки. Необходимо отметить, что физическое моделирование показывает качественную картину влияния технологических факторов разливки на особенности структурообразования и степень развития дефектных зон. Результаты моделирования позволяют исключить проведение трудо- и энергозатратных экспериментов в реальных промышленных условиях.

В связи с этим целью данной работы является изучение влияния способа и скорости разливки расплава на процесс затвердевания и особенности формирования осевой зоны слитка.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В данной работе использовался метод физического моделирования слитков. Была разработана и изготовлена лабораторная установка (изложница-кристаллизатор) [29], с помощью которой визуально изучали процессы, происходящие при затвердевании и структурообразовании модельных слитков. Изложница-кристаллизатор представляет собой плоский алюминиевый

кристаллизатор, имеющий форму наружного контура слитка. Внутри кристаллизатора находятся технологические отверстия для подвода охлаждающей жидкости – воды, которая подавалась в обе стенки кристаллизатора для обеспечения равномерного теплоотвода. С боковых сторон пространство между стенками кристаллизатора закрывается органическим стеклом. Геометрические параметры реального промышленного и модельного слитков представлены в табл. 1.

В качестве моделирующего раствора использовали натрий серноватистоокислый (кристаллический гипосульфит) – $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Температура начала затвердевания – в пределах 48 – 52 °С.

Соответствие процессов, происходящих на модели и в реальных условиях отливки промышленных слитков, оценивалось с помощью критериев подобия: критерия Фруда (Fr), критерия Рейнольдса (Re), критерия Вебера (We), критерия Био (Bi) и критерия гомотронности Фурье (Fo). Они получены на основе теории размерностей, исходя из анализа физико-химических процессов, происходящих при разливке и кристаллизации слитка. Кроме приведенных выше известных критериев, использовали также критерий затвердевания (фазового перехода) N , который описывает отношение теплоты фазового перехода к теплоте охлаждения [7, 26].

Приведенный в работе [7] расчет критериев подобия (Bi, N, Fo, Fr, We) для данного вещества показал, что они находятся в одном порядке, как и для стали.

Разливка расплава в изложницу-кристаллизатор выполнялась двумя способами: сверху и сифоном. При разливке сверху заливка расплава в изложницу-кристаллизатор производилась через промежуточный ковш. Заливку расплава сифонным способом осуществ-

ляли через разливочные стаканы различного диаметра (табл. 2). Применение при сифонном способе разливочного стакана большего размера ограничивалось фиксированным диаметром подводящего штуцера к изложнице-кристаллизатору.

При моделировании слитков геометрические и технологические параметры отливки оставались неизменными, изменялась только скорость разливки расплава. Для этого использовали разливочные стаканы различного диаметра (см. табл. 1, 2).

Скорость разливки выбиралась, исходя из линейной скорости разливки кузнечного слитка массой 19,0 т, которая, в зависимости от марки стали, согласно технологическим инструкциям составляет 0,233 – 0,395 м/мин. Для обеспечения максимального подобия при моделировании выбран диаметр разливочного отверстия в модели промежуточной разливочной воронки (см. табл. 2), равный 11 и 18 мм. Для получения более полной картины влияния скорости разливки смоделировано затвердевание при минимально возможной скорости для условий моделирования.

В процессе моделирования продвигающийся фронт кристаллизации разделяли на две составляющие: горизонтальная кристаллизация (твердая фаза, нарастающая последовательно от стенок к центру изложницы) и вертикальная кристаллизация (продвижение твердой фазы в вертикальном направлении от низа к центру изложницы).

После заливки расплава в изложницу-кристаллизатор через каждые 5 мин по сечению слитка в верхней подприбыльной части от края к центру и по оси слитка от низа к верхней части слитка измеряли толщину затвердевшего слоя. По окончании процесса кристаллизации расплава гипосульфита проводилось измерение

Таблица 1

Геометрические параметры промышленного и модельного слитков

Table 1. Geometrical parameters of industrial and model ingots

Параметр	Слиток	
	промышленный (19,6 т)	модельный
H/D	2,15	2,3
Конусность тела слитка ($K_{\text{т.сл}}$), %	4,1	4,4
Конусность прибыльной надставки ($K_{\text{пр}}$), %	14,7	14,7
Объем тела слитка ($V_{\text{т.сл}}$), %	77,4	79,7
Объем прибыльной части слитка ($V_{\text{пр}}$), %	18,0	15,7
Объем донной части слитка ($V_{\text{дон}}$), %	4,6	4,5

Таблица 2

Технологические параметры отливки модельных слитков при разливке расплава сверху и сифоном

Table 2. Technological parameters of downhill cast and uphill cast model ingots

Параметр	Разливка				
	сверху			сифоном	
Температура заливки тела слитка ($T_{\text{зал}}$), °С	80				
Температура хладагента ($T_{\text{охл}}$), °С	7				
Время заливки тела слитка ($\tau_{\text{т.сл}}$), с	25				
Время заливки прибыли ($\tau_{\text{пр}}$), с	25				
Масса расплава ($M_{\text{распл}}$), г	685				
Диаметр разливочного стакана/отверстия ($D_{\text{ст}}$), мм	3	11	18	3	6
Массовая скорость разливки тела слитка ($v_{\text{масс}}^{\text{т.сл}}$), г/с	20	51	72	5	7,5

параметров осевой зоны модельного слитка: определялись протяженность и средняя ширина осевой зоны.

Для оценки изменения поля температур при разливке и кристаллизации слитка в работе проводили термометрирование поверхности модели изложницы в течение всего времени затвердевания. После окончания разливки в течение 30 мин производили фотосъемку кристаллизующегося расплава с интервалом в 5 мин, затем интервал съемки увеличивали до 20 мин. Термометрирование проводилось тепловизором Testo 875i. Полученные тепловизионные изображения обрабатывались с помощью программного обеспечения Testo IRSofT. Поскольку тепловизор позволяет произвести лишь термометрирование поверхности без непосредственного измерения температуры расплава, то в работе условно считали динамику изменения температуры расплава равной динамике изменения температуры поверхности модели изложницы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате обработки полученных данных построена зависимость влияния скорости разливки расплава на динамику нарастания твердой фазы в вертикальном (рис. 1, а) и горизонтальном (рис. 1, б) направлениях.

Анализ результатов показал, что изменение скорости разливки расплава не влияет на рост твердой фазы

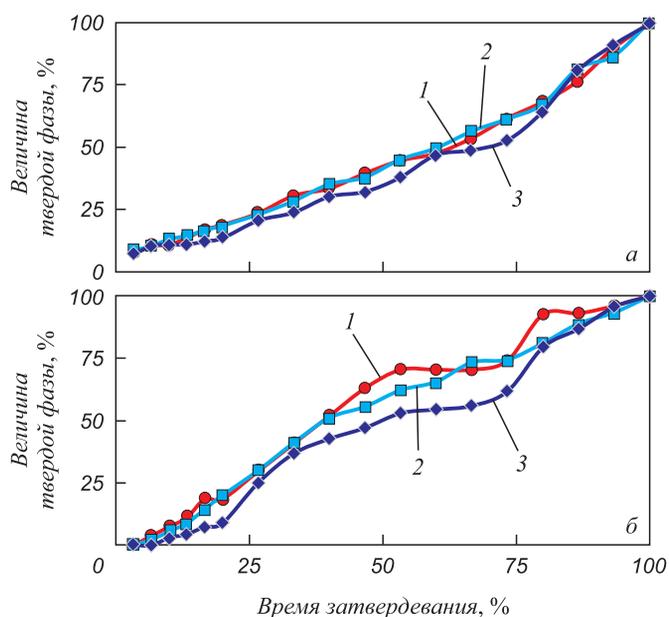


Рис. 1. Динамика нарастания твердой фазы в вертикальном (а) и горизонтальном (б) направлениях при отливке слитков сверху с различными скоростями разливки расплава:

1 – 20 г/с ($D_{ст} = 3$ мм); 2 – 51 г/с ($D_{ст} = 11$ мм);
3 – 72 г/с ($D_{ст} = 18$ мм)

Fig. 1. Dynamics of solid phase growth in the vertical (a) and horizontal (b) directions for uphill and downhill casting at different teeming rates:

1 – 20 g/s ($D_{st} = 3$ mm); 2 – 51 g/s ($D_{st} = 11$ mm);
3 – 72 g/s ($D_{st} = 18$ mm)

в вертикальном направлении и является идентичным, приближаясь к линейному закону (см. рис. 1, а).

Изменение скорости разливки расплава оказывает влияние на нарастание твердой фазы в горизонтальном направлении и описывается более сложной зависимостью с наличием горизонтального участка после половины времени затвердевания расплава (см. рис. 1, б). На протяжении практически всего времени затвердевания в вертикальном и горизонтальном направлениях величина твердой фазы выше у слитков, отлитых при меньших скоростях.

Анализ динамики нарастания твердой фазы в вертикальном и горизонтальном направлениях показал, что в течение первой четверти затвердевания слитков рост твердой фазы в горизонтальном направлении практически совпадает с вертикальным, а затем существенно ее опережает. Такой характер в нарастании твердой фазы можно объяснить уменьшением температурного градиента (рис. 2), возникающего вследствие роста слоя затвердевшего расплава от стенок изложницы к центру, что и приводит к снижению интенсивности затвердевания в этот момент времени.

Дальнейшее нарастание твердой фазы в горизонтальном направлении обусловлено тем, что перед плоскостью раздела в жидком расплаве скапливаются примеси и наступает эффект «концентрационного» пе-

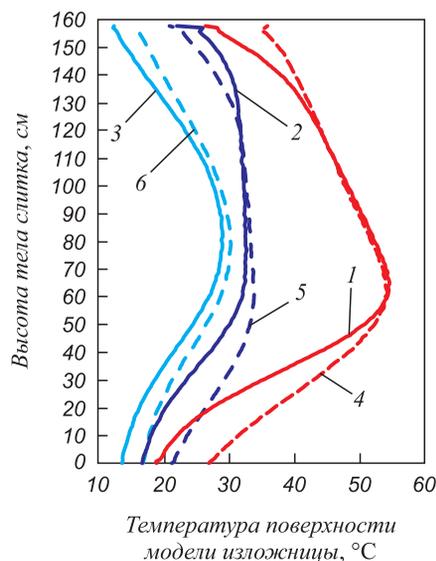


Рис. 2. Изменение температуры поверхности модели изложницы по высоте слитков, отлитых с различными скоростями разливки расплава сверху (на основании обработки тепловизионных изображений с помощью программного обеспечения Testo IRSofT):

1 – 5 мин ($D_{ст} = 3$ мм); 2 – 60 мин ($D_{ст} = 3$ мм);
3 – 140 мин ($D_{ст} = 3$ мм); 4 – 5 мин ($D_{ст} = 11$ мм);
5 – 60 мин ($D_{ст} = 11$ мм); 6 – 140 мин ($D_{ст} = 11$ мм)

Fig. 2. Changes in the surface temperature of the mould model from top to bottom of downhill cast ingots teemed at different rates (as per the thermal imaging processed with the Testo IRSofT software):

1 – 5 min ($D_{st} = 3$ mm); 2 – 60 min ($D_{st} = 3$ mm);
3 – 140 min ($D_{st} = 3$ mm); 4 – 5 min ($D_{st} = 11$ mm);
5 – 60 min ($D_{st} = 11$ mm); 6 – 140 min ($D_{st} = 11$ mm)

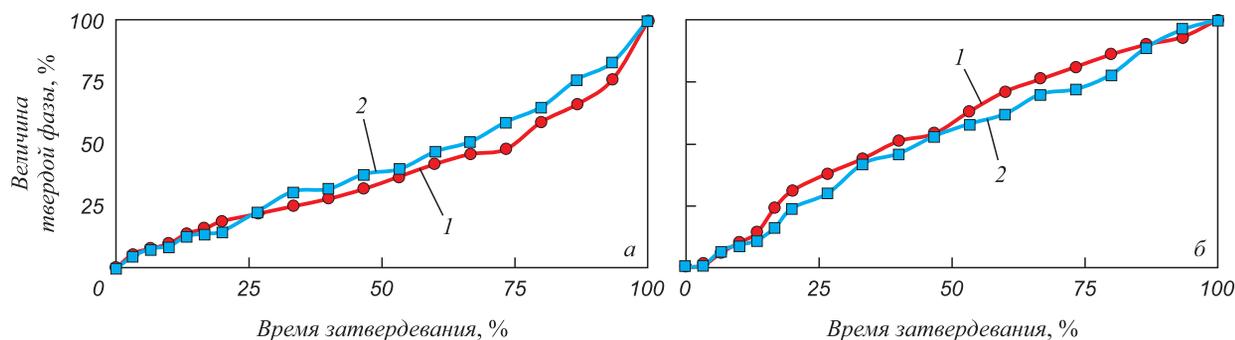


Рис. 3. Динамика нарастания твердой фазы в вертикальном (а) и горизонтальном (б) направлениях при отливке слитков сифоном с различными скоростями разливки расплава: 1 – 5 г/с ($D_{ст} = 3$ мм); 2 – 7,5 г/с ($D_{ст} = 6$ мм)

Fig. 3. Solid phase propagation in the vertical (a) and horizontal (б) directions for uphill cast ingots teemed at different teeming rates: 1 – 5 g/s ($D_{st} = 3$ мм); 2 – 7.5 g/s ($D_{st} = 6$ мм)

реохлаждения. Он приводит к интенсивной кристаллизации расплава по объемному механизму за счет образования в этой зоне отдельных глобулярных дендритов на «подложках» мелких частиц и включений.

По сравнению с разливкой сверху при сифонном способе наблюдается более интенсивный рост твердой фазы в вертикальном направлении (рис. 3, а). При этом повышению интенсивности кристаллизации в вертикальном направлении способствует большая скорость разлировки расплава 7,5 г/с ($D_{ст} = 6$ мм), а для кристаллизации в горизонтальном направлении более значимой является малая скорость разлировки расплава 5 г/с ($D_{ст} = 3$ мм).

Полученные результаты можно объяснить следующими особенностями процесса кристаллизации модельного слитка при его отливке сифоном. При большей

скорости разлировки расплав заполняет изложницу при относительно высоких температурах, что обеспечивает образование значимого температурного градиента между тепловым центром слитка и его более холодной донной частью. Это и способствует интенсификации процесса кристаллизации в вертикальном направлении. При меньшей скорости разлировки прохождение расплава через сифонные каналы вызывает его дополнительное охлаждение. Соприкасаясь с холодными стенками изложницы, расплав охлаждается в еще большей степени, что и вызывает ускорение процесса кристаллизации в горизонтальном направлении.

После затвердевания модельных слитков проводилась оценка влияния скорости разлировки расплава на протяженность и ширину осевой зоны (рис. 4 – 6). Анализ полученных результатов показал, что изменение

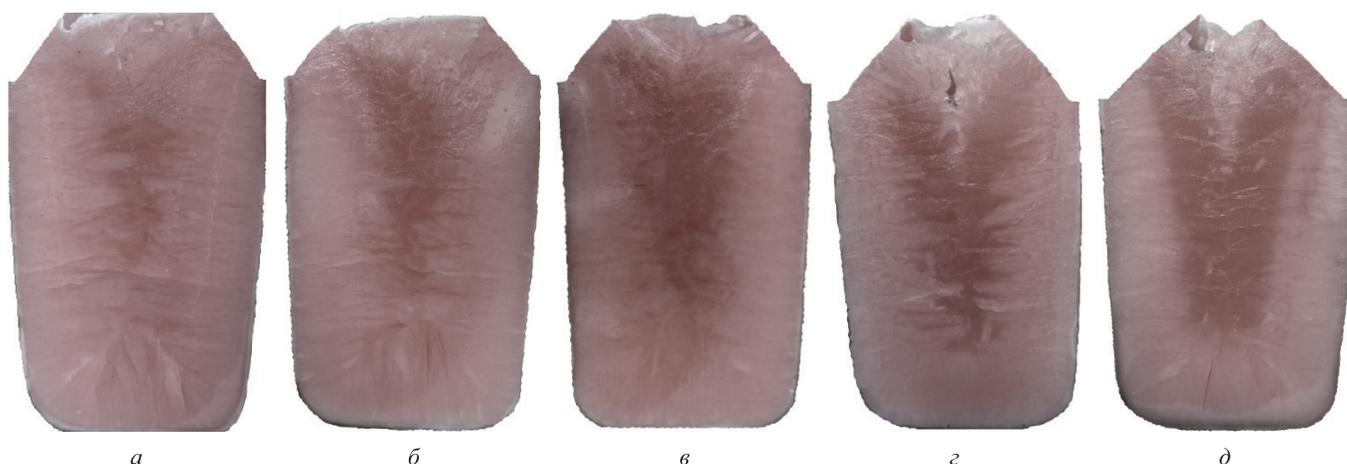


Рис. 4. Макроструктура модельных слитков, отлитых при различных скоростях разлировки расплава сверху и сифоном: а – массовая скорость разлировки расплава сверху 20 г/с ($D_{ст} = 3$ мм); б – массовая скорость разлировки расплава сверху 51 г/с ($D_{ст} = 11$ мм); в – массовая скорость разлировки расплава сверху 72 г/с ($D_{ст} = 18$ мм); г – массовая скорость разлировки расплава сифоном 5 г/с ($D_{ст} = 3$ мм); д – массовая скорость разлировки расплава сифоном 7,5 г/с ($D_{ст} = 6$ мм)

Fig. 4. Macrostructure of downhill and uphill cast model ingots teemed at different rates: а – mass downhill teeming rate 20 g/s ($D_{st} = 3$ мм); б – mass uphill teeming rate 51 g/s ($D_{st} = 11$ мм); в – mass downhill teeming rate 72 g/s ($D_{st} = 18$ мм); г – mass uphill teeming rate 5 g/s ($D_{st} = 3$ мм); д – mass uphill teeming rate 7.5 g/s ($D_{st} = 6$ мм)

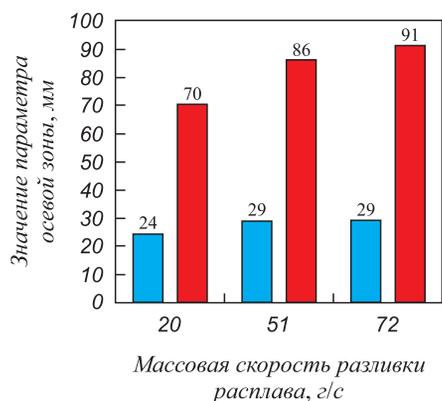


Рис. 5. Изменение протяженности (■) и средней ширины (■) осевой зоны модельных слитков, отлитых при различных скоростях разливки расплава сверху

Fig. 5. Change in length (■) and medium width (■) of the axial zone of model ingots teemed at different downhill teeming rates

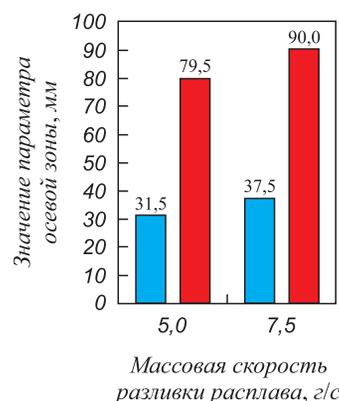


Рис. 6. Изменение протяженности (■) и средней ширины (■) осевой зоны модельных слитков, отлитых при различных скоростях разливки расплава сифоном

Fig. 6. Changes in length (■) and medium width (■) of the axial zone of model ingots teemed at different uphill rates

скорости разливки расплава оказывает влияние на протяженность осевой зоны, с увеличением которой значения параметров возрастают. Наименьшими значениями ширины и протяженности осевой зоны обладают модельные слитки, отлитые при малой скорости разливки расплава. Это можно объяснить тем, что при разливке расплава с малой скоростью увеличивается его степень переохлаждения, которая приводит к возрастанию скорости кристаллизации, а, следовательно, и увеличению скорости нарастания твердой фазы.

На рис. 7, 8 приведены поля распределения температур в модельных слитках. Термометрирование поверхности модели изложницы при затвердевании модельного слитка, отлитого при разливке сверху, показало (рис. 7), что тепловой центр к концу процесса затвердевания перемещается на уровень 2/3 высоты тела слитка, что соответствует существующим представлениям о процессе затвердевания крупных слитков [1, 2]. В процессе затвердевания температура расплава в слитке, отлитом с большей скоростью разливки

сверху (см. рис. 2 – пунктирные линии) выше температуры расплава в слитке, отлитом с меньшей скоростью (см. рис. 2 – сплошные линии).

Термометрирование поверхности модели изложницы при затвердевании модельного слитка, отлитого при разливке сифоном, показало (рис. 8), что после окончания разливки тепловой центр находится в нижней части слитка, что свидетельствует о нахождении в этой области более горячего расплава. Исследование полученных термограмм продемонстрировало влияние изменения скорости наполнения изложницы при разливке сифонным способом на динамику тепловых процессов, происходящих при кристаллизации слитка. При разливке с меньшей скоростью (рис. 8, а) тепловой центр на пятой минуте затвердевания находится еще в нижней части слитка, как в наиболее горячей области после окончания разливки. Однако в этот же период времени, но при разливке с большей скоростью (рис. 8, б), тепловой центр перемещается в верхнюю половину слитка. На десятой минуте после окончания разливки тепловой

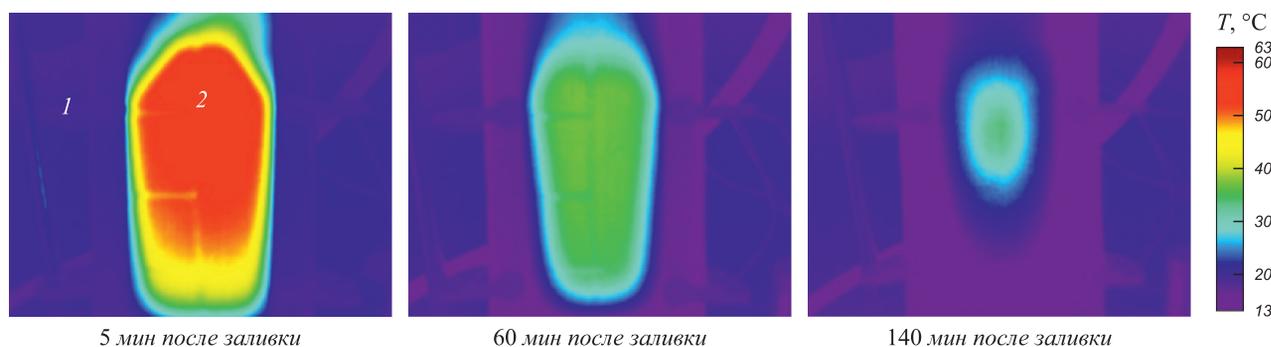


Рис. 7. Динамика перемещения теплового центра при затвердевании модельного слитка, отлитого сверху при массовой скорости разливки 20 г/с ($D_{ст} = 3$ мм):
1 – стенки изложницы; 2 – расплав

Fig. 7. Dynamics of thermal center movement during solidification of downhill cast model ingots teemed at mass teeming rate of 20 g/s ($D_{st} = 3$ mm):
1 – walls of the mould; 2 – the melt

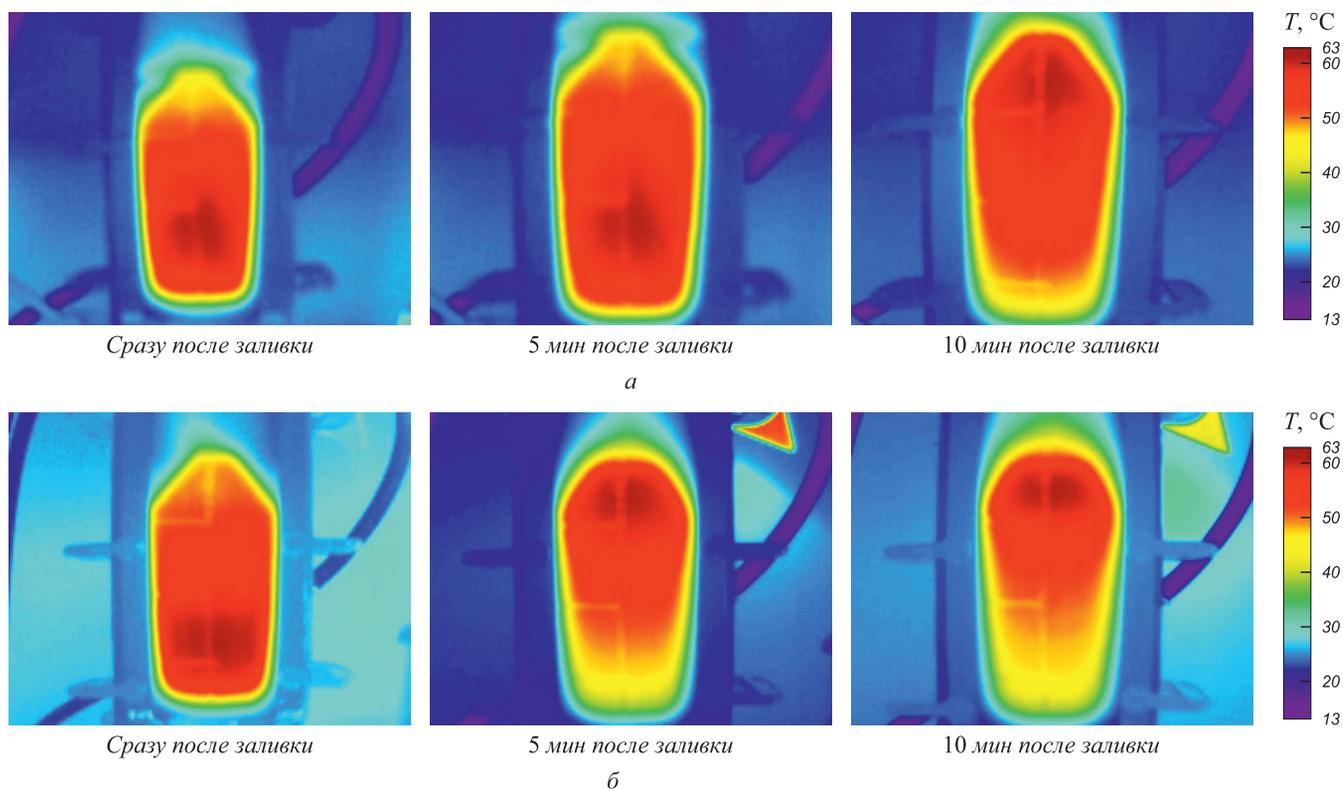


Рис. 8. Динамика перемещения теплового центра при затвердевании модельных слитков, отлитых сифоном при различной скорости разливки:

а – массовая скорость разливки расплава 5 г/с ($D_{ст} = 3$ мм); б – массовая скорость разливки расплава 7,5 г/с ($D_{ст} = 6$ мм)

Fig. 8. Dynamics of thermal center movement during solidification of uphill cast model ingots teemed at different rates: а – mass teeming rate 5 g/s ($D_{st} = 3$ mm); б – mass teeming rate 7.5 g/s ($D_{st} = 6$ mm)

центр в обоих случаях располагается в верхней части слитка.

Выводы

На основании проведенных лабораторных исследований установлено, что скорость разливки расплава оказывает влияние на область формирования осевой зоны слитка. Ее возрастание приводит к увеличению протяженности осевой зоны, что обусловлено более высокими температурными режимами, при которых протекает процесс кристаллизации, и активным фор-

мированием усадочных дефектов. При этом ширина осевой зоны меняется незначительно.

Установлено, что уменьшение скорости разливки расплава приводит к увеличению направленности кристаллизации и улучшению литой структуры осевой зоны слитка, затвердевающей в последнюю очередь в самых неблагоприятных условиях.

Таким образом, за счет соответствующего подбора скоростных режимов отливки крупного слитка можно оказывать воздействие на процесс затвердевания стали в изложнице и особенности формирования осевой зоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Скобло С.Я., Казачков Е.А. Слитки для крупных поковок. Москва: Metallurgiya, 1973. 247 с.
2. Смирнов А.Н., Макуров С.Л., Сафонов В.М., Цупрун А.Ю. Крупный слиток. Донецкий национальный технический университет. Донецк: Вебер, 2009. 279 с.
3. Жульев С.И., Зюбан Н.А. Производство и проблемы качества кузнечного слитка. Волгоград: РПК «Политехник», 2003. 168 с.
4. Qian S., Hu X., Cao Y., Kang X., Li D. Hot top design and its influence on feeder channel segregates in 100-ton steel ingots // *Materials & Design*. 2015. Vol. 87. P. 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.150>

1. Skoblo S.Ya., Kazachkov E.A. *Ingots for Large Forgings*. Moscow: Metallurgiya, 1973, 247 p. (In Russ.).
2. Smirnov A.N., Makurov S.L., Safonov V.M., Tsuprun A.Yu. *Large Ingots*. Donetsk: Veber, 2009, 279 p. (In Russ.).
3. Zhul'ev S.I., Zyuban N.A. *Production of Forging Ingots and Problems with Their Quality*. Volgograd: RPK "Politekhnik", 2003, 168 p. (In Russ.).
4. Qian S., Hu X., Cao Y., Kang X., Li D. Hot top design and its influence on feeder channel segregates in 100-ton steel ingots. *Materials & Design*. 2015, vol. 87, pp. 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.150>

5. Зюбан Н.А., Рущкий Д.В., Гаманюк С.Б., Стяжин А.Н., Сидоров А.А. Исследование дефектов литой структуры осевой зоны слитков стали 38ХН3МФА и их поведение во время осадки // Сталь. 2011. № 4. С. 24–27.
6. Tashiro K., Watanabe S., Kitagawa I., Tamura I. Influence of mould design on the solidification and soundness of heavy forging ingots // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. 1983. Vol. 23. No. 4. P. 312–321.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.23.312>
7. Гаманюк С.Б. Исследование крупного кузнечного стального слитка измененной геометрии с целью повышения качества металла поковок: Диссертация ... кандидата технических наук. Волгоград, 2012. 162 с.
8. Ромашкин А.Н., Мальгинов А.Н., Толстых Д.С., Иванов И.А., Дуб В.С. Влияние геометрии слитка на объем осевой рыхлости в нем // Компьютерные исследования и моделирование. 2015. Т. 7. № 1. С. 107–112.
<https://doi.org/10.20537/2076-7633-2015-7-1-107-112>
9. Wang J., Fu P., Liu H., Li D., Li Y. Shrinkage porosity criteria and optimized design of a 100-ton 30Cr2Ni4MoV forging ingot // Materials & Design. 2012. Vol. 35. P. 446–456.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.056>
10. Zhang C.-J., Bao Y.-P., Wang M. Influence of casting parameters on shrinkage porosity of a 19-ton steel ingot // Metallurgia Italiana. 2016. Vol. 108. No. 1. P. 37–44.
11. Zhang C.-J., Bao Y.-P., Wang M., Guo B. Influence of casting parameters on the shrinkage porosity of a 40-ton steel ingot by numerical simulation // Proceedings of the 6th Int. Congress on the Science and Technology of Steelmaking. 2015. P. 543–546.
12. Yu Z., Zhang H., Wang X., Wu X. Study on heat transfer characteristics during solidification of 18-ton steel ingot with large ratio of height to diameter // Metallurgia Italiana. 2020. Vol. 112. No. 5. P. 37–47.
13. Zhang C., Loucif A., Jahazi M., Morin J.-B. FE modelling and prediction of macrosegregation patterns in large size steel ingots: Influence of filling rate // Metals. 2022. Vol. 12. No. 1. Article 29.
<https://doi.org/10.3390/met12010029>
14. Zhang C., Loucif A., Jahazi M., Tremblay R., Lapierre L.-P. On the effect of filling rate on positive macrosegregation patterns in large size cast steel ingots // Applied Sciences (Switzerland). 2018. Vol. 8. No. 10. Article 1878. <https://doi.org/10.3390/app8101878>
15. Marx K., Rödi S., Schramhauser S., Seemann M. Optimization of the filling and solidification of large ingots // Metallurgia Italiana. 2014. Vol. 106. No. 11–12. P. 11–19.
16. Ромашкин А.Н., Мальгинов А.Н., Дуб В.С., Колпишон Э.Ю. Особенности технологии сифонной отливки слитков // Электрометаллургия. 2013. № 1. С. 18–23.
17. Duan Z., Shen H., Liu B. Numerical simulation of solidification and macrosegregation in water cooled heavy steel ingot // Proceedings of the 8th Pacific Rim Int. Congress on Advanced Materials and Processing (PRICM-8). 2016. P. 3025–3032.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-48764-9_374
18. Chen Z., Zhai Q., Zhang J. Validation and numerical simulation for shrinkage porosity of a X12 steel ingot // TMS 2015 144th Annual Meeting & Exhibition. 2015. P. 1209–1216.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-48127-2_146
19. Lü N., Jin Y., Li S., Ai X., Yuan X. Numerical simulation on gradient cooling behavior of jumbo slab ingot // China Foundry. 2013. Vol. 10. No. 2. P. 87–91.
20. Kotásek O., Kurka V., Vindyš M., Jonšta P., Noga R., Dobiáš M. Comparison of casting and solidification of 12-ton steel ingot using two different numerical software // Proceedings 30th Anniversary Int. Conf. on Metallurgy and Materials. 2021. P. 147–152.
<https://doi.org/10.37904/metal.2021.4091>
5. Zyuban N.A., Rutsikii D.V., Gamanyuk S.B., Styazhin A.N., Sidorov A.A. Cast-structure defects in the axial zone of 38ХН3МФА steel ingots and their behavior in upsetting. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 4, pp. 318–322.
<https://doi.org/10.3103/S0967091211040255>
6. Tashiro K., Watanabe S., Kitagawa I., Tamura I. Influence of mould design on the solidification and soundness of heavy forging ingots. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*. 1983, vol. 23, no. 4, pp. 312–321.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.23.312>
7. Gamanyuk S.B. *Investigation of a large forging steel ingot of modified geometry in order to improve the quality of metal forgings: Cand. Tech. Sci. Diss.* Volgograd: 2012, 162 p. (In Russ.).
8. Romashkin A.N., Malginov A.N., Tolstyh D.S., Ivanov I.A., Doub V.S. The ingot geometry effect on the axial shrinkage. *Computer Research and Modeling*. 2015, Vol. 7, no. 1, pp. 107–112. (In Russ.). <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2015-7-1-107-112>
9. Wang J., Fu P., Liu H., Li D., Li Y. Shrinkage porosity criteria and optimized design of a 100-ton 30Cr2Ni4MoV forging ingot. *Materials & Design*. 2012, vol. 35, pp. 446–456.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.09.056>
10. Zhang C.-J., Bao Y.-P., Wang M. Influence of casting parameters on shrinkage porosity of a 19 ton steel ingot. *Metallurgia Italiana*. 2016, vol. 108, no. 1, pp. 37–44.
11. Zhang C.-J., Bao Y.-P., Wang M., Guo B. Influence of casting parameters on the shrinkage porosity of a 40 ton steel ingot by numerical simulation. *Proceedings of the 6th Int. Congress on the Science and Technology of Steelmaking*, 2015, pp. 543–546.
12. Yu Z., Zhang H., Wang X., Wu X. Study on heat transfer characteristics during solidification of 18-ton steel ingot with large ratio of height to diameter. *Metallurgia Italiana*. 2020, vol. 112, no. 5, pp. 37–47.
13. Zhang C., Loucif A., Jahazi M., Morin J.-B. FE modelling and prediction of macrosegregation patterns in large size steel ingots: Influence of filling rate. *Metals*. 2022, vol. 12, no. 1, article 29.
<https://doi.org/10.3390/met12010029>
14. Zhang C., Loucif A., Jahazi M., Tremblay R., Lapierre L.-P. On the effect of filling rate on positive macrosegregation patterns in large size cast steel ingots. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2018, vol. 8, no. 10, article 1878. <https://doi.org/10.3390/app8101878>
15. Marx K., Rödi S., Schramhauser S., Seemann M. Optimization of the filling and solidification of large ingots. *Metallurgia Italiana*. 2014, vol. 106, no. 11–12, pp. 11–19.
16. Romashkin A.N., Mal'ginov A.N., Dub V.S., Kolpishon E.Yu. Features of uphill casting of ingots. *Elektrometallurgiya*. 2013, vol. 1, pp. 18–23. (In Russ.).
17. Duan Z., Shen H., Liu B. Numerical simulation of solidification and macrosegregation in water cooled heavy steel ingot. *Proceedings of the 8th Pacific Rim Int. Congress on Advanced Materials and Processing (PRICM-8)*. 2016, pp. 3025–3032.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-48764-9_374
18. Chen Z., Zhai Q., Zhang J. Validation and numerical simulation for shrinkage porosity of a X12 steel ingot. *TMS 2015 144th Annual Meeting & Exhibition*. 2015, pp. 1209–1216.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-48127-2_146
19. Lü N., Jin Y., Li S., Ai X., Yuan X. Numerical simulation on gradient cooling behavior of jumbo slab ingot. *China Foundry*. 2013, vol. 10, no. 2, pp. 87–91.
20. Kotásek O., Kurka V., Vindyš M., Jonšta P., Noga R., Dobiáš M. Comparison of casting and solidification of 12 ton steel ingot using two different numerical software. *Proceedings 30th Anniversary Int. Conf. on Metallurgy and Materials*. 2021, pp. 147–152.
<https://doi.org/10.37904/metal.2021.4091>

21. Ромашкин А.Н., Дуб В.С., Иванов И.А., Марков С.И., Мальгинов А.Н., Толстых Д.С. Разработка сквозного технологического процесса производства заготовок для машиностроения на основе компьютерного моделирования // *Металлург*. 2014. № 9. С. 109–117.
22. Kang J., Zhang C., Dong C., Shen H., Liu B. Water analogy experiment on the multi-concentration pouring process of a 585-ton steel ingot // *Frontiers in Materials Processing, Applications, Research and Technology*. 2018. P. 107–121. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4819-7_11
23. Дуб В.С., Ромашкин А.Н., Толстых Д.С., Мальгинов А.Н., Иванов И.А., Эхвая Г.А. Анализ кинетики затвердевания стальных кузнечных слитков различной конфигурации. Часть I. Результаты холодного моделирования // *Металлург*. 2015. № 11. С. 41–56.
24. Ludwig A., Stefan-Kharicha M., Kharicha A., Wu M. Massive formation of equiaxed crystals by avalanches of mushy zone segments // *Metallurgical and Materials Transaction A*. 2017. Vol. 48. P. 2927–2930. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4008-y>
25. Stefan-Kharicha M., Kharicha A., Mogeritsch J., Wu M., Ludwig A. Review of ammonium chloride-water solution properties // *Journal of Chemical and Engineering*. 2018. Vol. 63. P. 3170–3183. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.7b01062>
26. Эльдарханов А.С., Ефимов В.А., Нурадинов А.С. Процессы формирования отливок и их моделирование. Москва: Машиностроение, 2001. 208 с.
27. Смирнов А.Н., Пилюшенко В.Л., Момот С.В., Амитан В.Н. Затвердевание металлического расплава при внешних воздействиях. Донецк: Издательство «ВИК», 2002. 169 с.
28. Лейбензон В.А., Недопекин Ф.В., Кондратенко В.М. Затвердевание металлических композиций: производство и моделирование. Донецк: ООО «Юго-восток, Лтд», 2005. 231 с.
29. Пат. 169365 RU. Устройство для исследования процесса кристаллизации слитков в изложнице / С.Б. Гаманюк, Н.А. Зюбан, Д.В. Руцкий, С.В. Палаткин; заявлено 24.05.2016; опубликовано 15.03.2017. Бюллетень № 8.
21. Romashkin A.N., Dub V.S., Ivanov I.A., Markov S.I., Mal'ginov A.N., Tolstykh D.S. Development of an integral production process for manufacturing machinery billets based on computer simulation. *Metallurgist*. 2015, vol. 58, no. 9–10, pp. 821–830. <https://doi.org/10.1007/s11015-015-0002-z>
22. Kang J., Zhang C., Dong C., Shen H., Liu B. Water analogy experiment on the multi-concentration pouring process of a 585 ton steel ingot. *Frontiers in Materials Processing, Applications, Research and Technology*. 2018, pp. 107–121. https://doi.org/10.1007/978-981-10-4819-7_11
23. Dub V.S., Romashkin A.N., Tolstykh D.S., Mal'ginov A.N., Ivanov I.A., Ekhvaya G.A. Analysis of the kinetics of the solidification of steel forging ingots of different configurations. Part I. Results from cold modeling. *Metallurgist*. 2016, vol. 59, no. 11–12, pp. 1040–1052. <https://doi.org/10.1007/s11015-016-0213-y>
24. Ludwig A., Stefan-Kharicha M., Kharicha A., Wu M. Massive formation of equiaxed crystals by avalanches of mushy zone segments. *Metallurgical and Materials Transaction A*. 2017, vol. 48, pp. 2927–2930. <https://doi.org/10.1007/s11661-017-4008-y>
25. Stefan-Kharicha M., Kharicha A., Mogeritsch J., Wu M., Ludwig A. Review of ammonium chloride-water solution properties. *Journal of Chemical and Engineering*. 2018, vol. 63, pp. 3170–3183. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.7b01062>
26. El'darkhanov A.S., Efimov V.A., Nuratdinov A.S. *Casting Processes and Their Modeling*. Moscow: Mashinostroenie, 2001, 208 p. (In Russ.).
27. Smirnov A.N., Pilyushenko V.L., Momot S.V., Amitan V.N. *Solidification of Metal Melt under External Influences*. Donetsk: VIK, 2002, 169 p. (In Russ.).
28. Leibenzon V.A., Nedopekin F.V., Kondratenko V.M. *Solidification of Metal Compositions: Production and Modeling*. Donetsk: Yugo-vostok Ltd., 2005, 231 p. (In Russ.).
29. Gamanyuk S.B., Zyuban N.A., Rutskii D.V., Palatkin S.V. *Device for studying the process of ingots crystallization in a mill*. Patent RF no. 169365. MPK B22D 7/08. *Bulleten' izobretenii*. 2017, no. 8. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Борисович Гаманюк, к.т.н., доцент кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет

E-mail: gamanuk@mail.ru

Дмитрий Владимирович Руцкий, к.т.н., доцент, и.о. заведующего кафедрой «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет

E-mail: drutskii@vstu.ru

Николай Александрович Зюбан, д.т.н., профессор кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет

E-mail: tecmat@vstu.ru

Михаил Владимирович Кириличев, студент, Волгоградский государственный технический университет

Макс Станиславович Никитин, аспирант кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет

E-mail: tecmat@vstu.ru

Дмитрий Николаевич Гурулев, к.т.н., доцент кафедры «Технология материалов», Волгоградский государственный технический университет

E-mail: tecmat@vstu.ru

Sergei B. Gamanyuk, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Materials Technology", Volgograd State Technical University

E-mail: gamanuk@mail.ru

Dmitrii V. Rutskii, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Acting Head of the Chair "Materials Technology", Volgograd State Technical University

E-mail: drutskii@vstu.ru

Nikolai A. Zyuban, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair "Materials Technology", Volgograd State Technical University

E-mail: tecmat@vstu.ru

Mikhail V. Kirilichev, Student, Volgograd State Technical University

Maks S. Nikitin, Postgraduate of the Chair "Materials Technology", Volgograd State Technical University

E-mail: tecmat@vstu.ru

Dmitrii N. Gurulev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Materials Technology", Volgograd State Technical University

E-mail: tecmat@vstu.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

С. Б. Гаманюк – анализ литературных источников, обработка результатов исследований, написание основного текста статьи, подготовка библиографического списка.

Д. В. Руцкий – определение цели и задачи исследования, формирование концепции, редактирование финальной версии статьи.

Н. А. Зюбан – научное руководство, анализ результатов исследований.

М. В. Кириличев – проведение исследований, обработка результатов исследований.

М. С. Никитин – проведение исследований, обработка результатов исследований.

Д. Н. Гурулев – проведение исследований, обработка результатов исследований.

S. B. Gamanyuk – analysis of the literature, processing of the research results, writing the text, preparation of the references.

D. V. Rutskii – setting the research goals and objectives, formation of the article concept, editing of the final text.

N. A. Zyuban – scientific guidance, analysis of the research results.

M. V. Kirilichev – conducting the research, processing of the research results.

M. S. Nikitin – conducting the research, processing of the research results.

D. N. Gurulev – conducting the research, processing of the research results.

Поступила в редакцию 25.04.2022

После доработки 12.09.2022

Принята к публикации 07.10.2022

Received 25.04.2022

Revised 12.09.2022

Accepted 07.10.2022



Оригинальная статья

УДК 669.162.1:629.4.02

DOI 10.17073/0368-0797-2022-11-824-830

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2437>

МОДЕРНИЗАЦИЯ ВАГОНА-ХОППЕРА ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ АГЛОМЕРАТА И ДРУГИХ МАТЕРИАЛОВ

А. В. Нефедов¹, Т. Г. Шкурко¹, Н. А. Чиченев²,
Н. В. Холодова³

¹ Новотроицкий филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (Россия, 426359, Оренбургская область, Новотроицк, ул. Фрунзе, 8)

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

³ Выксунский филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (Россия, 607036, Нижегородская область, Выкса, р. п. Шиморское, ул. Калинина, 206)

Аннотация. Приведены результаты анализа работоспособности транспортирующего оборудования агломерационных цехов металлургических предприятий уральского региона. Установлено, что в процессе длительной эксплуатации вагона-хоппера для перевозки горячего агломерата на его стенках оседает пыль, образуются наросты из слежавшейся пыли, а также возникает эффект сводообразования. Вследствие процесса уплотнения и увеличения слоя пыли происходит уменьшение полезного объема вагона-хоппера, что, в свою очередь, приводит к необходимости проведения опасных работ по очистке пыли непосредственно внутри вагона-хоппера. Для его очистки для перевозки горячего агломерата применяется ручной труд. Такие работы имеют высокую опасность для человеческого здоровья вследствие высокой запыленности и высокой травмоопасности производимых работ. С целью устранения проблемы сводообразования и устранения налипания пыли на стенки вагона предложена установка двух вибрационных устройств типа «ложная стенка» совместно с виброгорбылем (вибрирующей балкой). Вибрирующим элементом устройства является плита, которую монтируют на внутренней стенке на гибких подвесах (круглозвенная цепь). Между плитой и стенкой бункера установлены резиновые амортизаторы, в качестве которых использована резиноканевая транспортерная лента. К плите через опорную стойку монтируют вибратор, а передача вибраций агломерату осуществляется с помощью виброгорбыля, который приварен к плите (ложной стенке). Внедрение проектируемого устройства обеспечит сокращение внеплановых простоев состава вагонов-хопперов и отказ от опасных для человеческого здоровья работ, связанных с очисткой бункеров. Экономический расчет подтверждает целесообразность проводимых мероприятий по реинжинирингу вагонов-хопперов в условиях агломерационного производства металлургических предприятий.

Ключевые слова: агломерационное производство, вагон-хоппер, сводообразование агломерата, площадочный вибратор, ложная стенка

Для цитирования: Нефедов А.В., Шкурко Т.Г., Чиченев Н.А., Холодова Н.В. Модернизация вагона-хоппера для перевозки агломерата и других материалов // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 11. С. 824–830. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-824-830>

Original article

MODERNIZATION OF HOPPER CAR FOR TRANSPORTATION OF AGGLOMERATE AND OTHER MATERIALS

A. V. Nefedov¹, T. G. Shkurko¹, N. A. Chichenev²,
N. V. Kholodova³

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

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

³ Vyksa Branch of the National University of Science and Technology “MISIS” (206 Kalinina Str., Shimorskoe, Vyksa District, Nizhny Novgorod Region 607036, Russian Federation)

Abstract. The paper considers results of the analysis of operability of the transporting equipment at agglomeration shops of the Ural metallurgical enterprises. It was established that during long-term operation of the hopper car for transportation of hot agglomerate, dust settles on its walls, growths of accumulated dust are formed, and the effect of vaulting occurs. Due to compaction and increase in dust layer, useful volume of the hopper

car decreases which in turn leads to the need to carry out dangerous work to clean the dust directly inside the hopper car. Manual labor is used for this purpose. Such works are very dangerous for human health due to high dust content and high injury risk. In order to eliminate the problem of vaulting and accumulation of dust on the car walls, it is proposed to use the installation of two vibrating devices of the “False wall” type together with a vibrating neck (vibrating beam). The vibrating element of the device is a plate that is mounted on the inner wall on flexible suspensions (round link chain). Rubber shock absorbers are installed between the plate and the hopper wall, which are used as rubber-fabric conveyor belt. A vibrator is mounted to the plate through the support post, and the transmission of vibrations to the agglomerate is carried out using a vibrating hump, which is welded to the plate (false wall). Introduction of the designed device ensures reduction of unplanned downtime of the hopper cars team and rejection of hazardous to human health work related to the bunkers cleaning. The economic calculation confirms feasibility of the ongoing measures for reengineering of hopper cars in the conditions of agglomerate production at metallurgical enterprises.

Keywords: agglomeration production, hopper car, agglomerate formation, platform vibrator, false wall

For citation: Nefedov A.V., Shkurko T.G., Chichenev N.A., Kholodova N.V. Modernization of hopper car for transportation of agglomerate and other materials. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 11, pp. 824–830. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-824-830>

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время надежность технических систем приобретает все более важное значение, и для металлургических машин и оборудования становится одной из основных научно-технических задач [1 – 5]. Недостаточная надежность технологических машин и входящих в них элементов и устройств приводит к значительному повышению расходов на их техническое обслуживание и существенному снижению производительности металлургического производства [6 – 9]. Повышение требований к качеству технологических машин и оборудования в целях снижения материальных, трудовых и финансовых затрат на техническое обслуживание и ремонт приводит к необходимости модернизации и реконструкции оборудования [10 – 13]. При этом большое внимание уделяется реинжинирингу оборудования горно-металлургического производства [14 – 17].

В работе рассмотрены вопросы модернизации вагонов-хопперов для перевозки горячего агломерата металлургических предприятий уральского региона.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Назначение агловоза (вагона-хоппера) заключается в том, чтобы транспортировать готовый агломерат из агломерационного цеха в доменный. При помощи вагонов-хопперов для перевозки горячего агломерата в доменный цех транспортируется около 60 % всего объема произведенного агломерата. Остальные 40 % транспортируются на конвейерах.

Вагон-хоппер – тип железнодорожного грузового вагона, который используется для транспортировки сыпучих материалов (агломерат, уголь, железная руда) и имеет возможность саморазгрузки. Его кузов представляет емкость в виде металлического бункера, в нижней части корпуса располагаются разгрузочные люки. При необходимости разгрузки эти люки открываются и сыпучий материал самотеком покидает полость вагона.

Агловозы, используемые в металлургическом производстве, являются вагонами-хопперами открытого типа. Загрузка готового агломерата в такие вагоны про-

изводится сверху. Обшивка кузова хоппера выполнена таким образом, что, в отличие от других типов хопперов, не имеет жесткой связи с несущим каркасом стенок. Это минимизирует явление коробления кузова от воздействия высоких температур и способствует легкому ремонту поврежденных элементов.

Вагоны-хопперы не являются самоходным железнодорожным транспортом, их приводит в движение локомотив. Агловозы используются исключительно на территории предприятий и не покидают его границ. Вагоны-хопперы для горячего агломерата перемещаются в доменный цех составами, состоящими из не более семи вагонов.

Выгрузка сырья происходит на обе стороны от железнодорожного полотна. Обеспечивается также полная механизация разгрузки без применения ручной очистки от остатков груза. По типу ссыпания вагоны-хопперы агломерационных цехов являются вагонами с боковой выгрузкой – внутренние воронки разведены в противоположные стороны и имеет угол наклона стенок от 41 до 60°. Такая конструкция обеспечивает выгрузку сырья силами тяготения. Разгрузка производится по обе стороны от железнодорожных путей. Наибольшее распространение получили вагоны-хопперы модели 20-9749 для перевозки горячего агломерата и окатышей, которые вмещают агломерат объемом около 31 м³ общей массой до 62 т^{1,2}.

В процессе длительной эксплуатации вагона-хоппера для перевозки горячего агломерата на его стенках оседает пыль, образуются наросты из слежавшейся пыли, а также возникает эффект сводообразования (рис. 1). Вследствие многочисленных перевозок агломерата слой пыли на наклонных торцевых стенках увеличивается и уплотняется. В особенности этот процесс усиливается в зимнее время из-за осадков.

За счет процесса уплотнения и увеличения слоя пыли происходит уменьшение полезного объема вагона-хоппера, что, в свою очередь, приводит к необходимости проведения опасных работ по очистке пыли

¹ Альбом-справочник «Грузовые вагоны железных дорог колеи 1520 мм». URL: <https://myrailway.ru/wagon/> (дата обращения 01.11.2022).

² Хоппер для горячих окатышей и агломерата модель 20-9749. URL: <https://wagon.by/model/20-9749/> (дата обращения 01.11.2022).

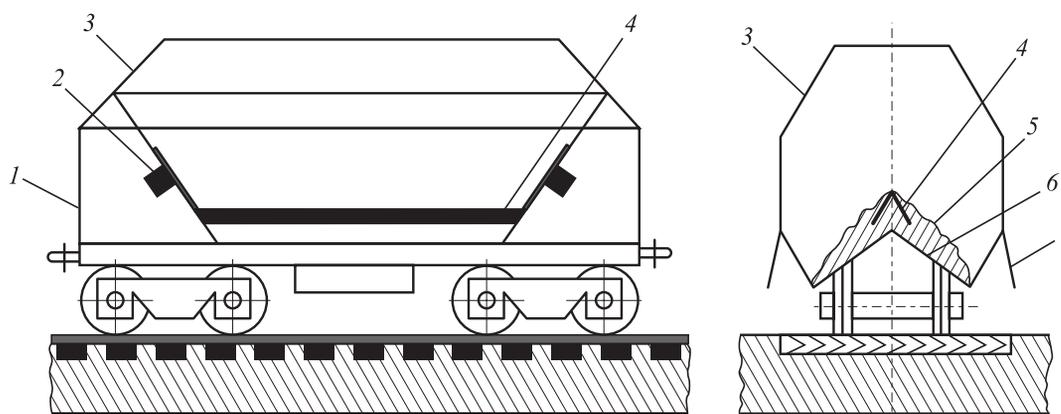


Рис. 1. Схема вагона-хoppers после модернизации:
1 – корпус; 2 – вибратор; 3 – бункер; 4 – вибрирующая балка (виброгорбыль); 5 – сводообразование агломерата;
6 – хребтовая балка; 7 – разгрузочный люк

Fig. 1. Scheme of hopper car after modernization:
1 – body; 2 – vibrator; 3 – bunker; 4 – vibrating beam (vibrohumpback); 5 – vaulting of agglomerate;
6 – ridge beam; 7 – unloading hatch

непосредственно внутри вагона-хoppers. Такие работы имеют высокую опасность для человеческого здоровья вследствие высокой запыленности и высокой травматичности производимых работ.

При перевозке агломерата в холодный период года происходит сильное налипание мокрых кусков на стенки вагона и хребтовую балку. Этот фактор приводит к их залипанию внутри вагона-хoppers, что может вызвать полное прекращения истечения из него материала.

Для очистки вагона-хoppers для перевозки горячего агломерата применяется ручной труд. Работы такого характера являются опасными для здоровья человека, потому что внутри емкости вагона-хoppers не предусмотрено никаких площадок, позволяющих безопасно проводить работы по очистке. При каждой разгрузке вагона-хoppers с загруженным в него агломератом необходимо прибегать к отбиванию намерзших и слежавшихся материалов при помощи кувалды. Такие работы выполняют один – два человека, временные затраты составляют от 5 до 20 мин. Также при производстве агломерата образуется пыль, которая содержит связанную и свободную двуокись кремния, окись железа, известь, кокс. 80 – 85 % пылевых частиц имеют размер менее 2 мкм. Производственная пыль является одним из неблагоприятных факторов, влияющих на здоровье человека. Агломерационная пыль может вызывать осложнения и заболевания легких (антракоз, пневмокониоз, силикоз, астма, рак легких).

С целью устранения сводообразования и налипания пыли на стенки вагона, проведен анализ различных методов решения данных проблем, в результате которого предложено применить вибрационный способ воздействия на агломерат. Метод показал свою эффективность в различных производственных процессах [18 – 22]. В данном случае принято решение, заключающееся

в установке площадочного вибратора на стенку вагона-хoppers.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Площадочный вибратор можно непосредственно закрепить на стенке вагона-хoppers с помощью сварки. Такая установка предотвращает зависание материала в бункере, но при этом, из-за значительной массы бункера, амплитуда колебания стенки будет недостаточна для эффективной работы устройства. Однако, если применять вибраторы большей мощности, это приведет к существенному удорожанию конструкции и нецелесообразности метода модернизации.

С целью обрушения слеживающейся пыли в вагонах-хoppers предложена установка двух вибрационных устройств типа «ложная стенка» совместно с виброгорбылем (вибрирующей балкой) (см. рис. 1). Вибрирующим элементом устройства «ложная стенка» является плита 2 (рис. 2), которую монтируют на внутренней стенке на гибких подвесах 4 (круглозвенная цепь). Между плитой и стенкой бункера установлены резиновые амортизаторы, в качестве которых использована резиноканевая транспортерная лента толщиной не менее 20 мм. Над плитой расположен защитный козырек для защиты от попадания материала под вибрационную плиту. К плите через опорную стойку 6 монтируют вибратор 7. Передача вибраций агломерату осуществляется с помощью виброгорбыля (вибрирующей балки) 1, который приварен к плите (ложной стенке) 2.

Достоинством этого варианта является то, что колебания передаются непосредственно материалу, а не стенкам вагона-хoppers (в случае крепления вибратора на стенку). В результате обеспечивается высокая эффективность обрушения слеживающейся пыли при сравнительно небольшой мощности вибратора.

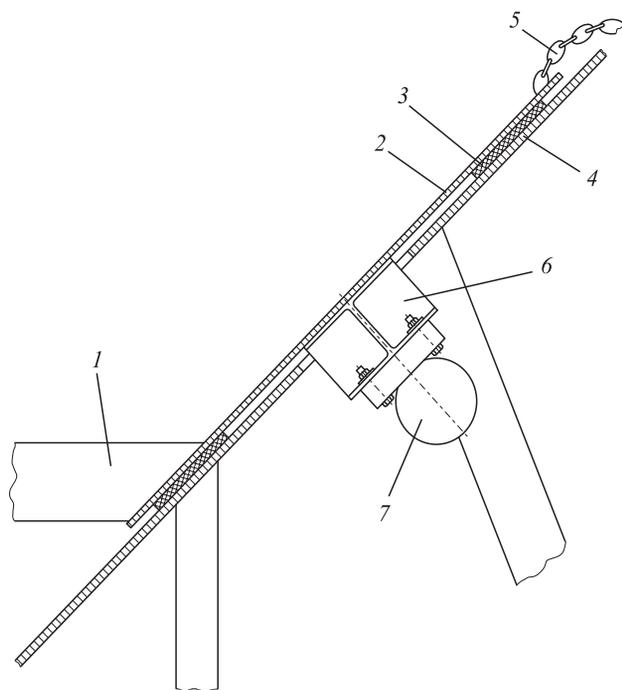


Рис. 2. Вибрационное устройство «ложная стенка»: 1 – вибрирующая балка (виброгорбыль); 2 – плита (ложная стенка); 3 – амортизатор (транспортная лента); 4 – стенка бункера; 5 – цепь; 6 – опора вибратора; 7 – вибратор

Fig. 2. Vibrating device “false wall”: 1 – vibrating beam (vibrohumpback); 2 – plate (false wall); 3 – shock absorber (conveyor belt); 4 – bunker wall; 5 – chain; 6 – vibrator support; 7 – vibrator

При включении вибраторов в электрическую сеть они приводят в движение ложные листы и спрессованная пыль на торцевых стенках обрушается. Совместно с этим виброгорбыль передает вибрацию агломерату у хребтовой балки, что способствует более интенсивному истечению материала из бункера. Использование такой установки позволяет отказаться от опасных для здоровья человека работ, а также позволяет использовать весь полезный объем вагона.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Вибратор – это дебалансный центробежный механизм, вынуждающая сила которого вызывается вращательным движением инерционного элемента. Вибратор представляет собой электродвигатель с установленными на концах вала ротора дебалансами, которые при вращении создают центробежную (вынуждающую) силу. Регулирование величины вынуждающей силы вибратора осуществляется путем изменения взаимного расположения дебалансов на обоих концах вала. Круговые колебания вибратора передаются конструкции, на которой он установлен.

Выбор подходящего вибратора происходит по величине требуемой вынуждающей силы. Для разгрузки бункеров рекомендуется использовать вибраторы

с частотой 3000 мин^{-1} (ИБ-01-50, ИБ-05-50, ИБ-11-50, ИБ-20-50, ИБ-40-50, ИБ-60-50; ИБ-98Б 42 В). При этом вынуждающая сила $F_{\text{вс}}$ должна составлять около $1/5$ массы материала в поперечном сечении бункера^{3, 4}. В случае использования двух вибрационных устройств – с двух сторон бункера (см. рис. 1), для одного вибратора вынуждающая сила будет равна

$$F_{\text{вс}} = \frac{m_{\text{агл}}}{5 \cdot 2} = \frac{62}{5 \cdot 2} = 6,2 \text{ кН},$$

где $m_{\text{агл}} = 62 \text{ т}$ – максимальная масса агломерата в вагоне-хоппере.

По расчетному значению вынуждающей силы $F_{\text{вс}} = 6,2 \text{ кН}$ выбираем из каталога площадной вибратор общего назначения высокого ресурса типа ИБ-98Б-442, имеющего следующие технические характеристики^{5, 6}:

Частота колебаний синхронная, мин^{-1}	3000
Максимальная вынуждающая сила при синхронной частоте колебаний, кН	11,3
Мощность номинальная потребляемая, кВт (не более)	0,9
Номинальное напряжение, В	380
Частота тока, Гц	50
Масса вибратора, кг	20
Средняя наработка до отказа, ч (не менее)	700

В вибраторе использован дебалансный регулируемый тип вибрационного механизма и асинхронный трехфазный электродвигатель с короткозамкнутым ротором.

Вынуждающая сила при синхронной частоте вращения $11,3 \text{ кН}$ соответствует режиму работы S3 40 % по ГОСТ Р 52776-2007, т. е. повторно-кратковременному режиму работы с продолжительностью включения 4 мин и отдыхом 6 мин. Однако в некоторых случаях вибратор может работать при продолжительном режиме работе S1, которому соответствует вынуждающая сила $7,6 \text{ кН}$.

Преимущество ложной стенки заключается в непосредственной передаче вибраций и колебаний оседающей пыли на стенках вагона-хоппера, что приводит к снижению необходимой вынуждающей мощности вибратора. Используя ложную стенку, можно в значительной мере сэкономить на расходе потребляемой электрической энергии и денежных затратах

³ Как подобрать вибратор, создающий достаточную вибрацию в зависимости от области его применения. Разгрузка бункеров. URL: <https://www.antikorpokraska.com.ua/articles/26> (дата обращения 01.11.2022).

⁴ Применение вибраторов. URL: https://promvibrator.ru/ploshadochny_vibrator.html (дата обращения 01.11.2022).

⁵ Вибратор ИБ-98Б 42 В. URL: <https://yarvibro.ru/catalog/item/iv-98b-1185/> (дата обращения 01.11.2022).

⁶ Вибратор ИБ-98Б 42 В. URL: <https://rusvibro.ru/vibratory/poverkhnostnye/obshchego-naznacheniya/iv-98b/> (дата обращения 01.11.2022).

на приобретение вибратора. Ложная стенка размером 1000×2000 мм и толщиной не менее 10 мм изготовлена из горячекатаного листа стали СтЗпс [23].

Для крепления вибратора к ложной стенке необходимо применять опорный элемент, в качестве которого можно использовать сварную конструкцию из металлопрокатных элементов или цельнолитую опору. Поскольку сварные швы склонны к разрушению и образованию трещин при динамических нагрузках, что характерно при вибрационных нагрузках, выбираем цельнолитую опору из стали 20Х13Л, которая рекомендована для использования в промышленности, в частности для изготовления деталей, подвергаемых ударным нагрузкам [24, 25].

Ложная стенка подвешивается сварными цепями, закрепленными на стенку вагона с внутренней стороны. Цепь использована круглозвенная типа 13×36, которая широко применяется в качестве тягового органа или подвесов [26].

Виброгорбыль представляет собой металлический профиль, расположенный параллельно контуру хребтовой балки. Вибрация этого элемента будет способствовать интенсификации истечения агломерата из вагона-хоппера. Кроме того, виброгорбыль препятствует сводообразованию пыли над хребтовой балкой. Изготовлен виброгорбыль из горячекатаного равнополочного прокатного уголка 200×200×12 мм [27]. Демпфирование уголка не требуется в связи с отсутствием контакта с хребтовой балкой. Виброгорбыль будет совершать колебательные движения за счет жесткой связи

с ложными листами, которая осуществляется с помощью электродуговой сварки.

Дополнительные капитальные затраты, необходимые для реинжиниринга вагона-хоппера, включают приобретение вибраторов, изготовление и монтаж ложных стенок, цельнолитых опор и виброгорбыля. Суммарные капитальные затраты на покупку оборудования, запасные части, логистику и стоимость монтажа нового оборудования для восьми вагонов-хопперов не превышают 350 тыс. рублей.

Выводы

Рассмотрена возможность реинжиниринга вагона-хоппера для перевозки агломерата и других сыпучих материалов с проектированием вибрационного устройства для обрушения налипших материалов на торцевых стенках и хребтовой балке. Определены технические решения для проектирования и внедрения в процесс производства агломерата вибрационных устройств, произведен выбор и проектирование соответствующих узлов и механизмов, дана оценка экономической эффективности и окупаемости предлагаемого инвестиционного проекта. Внедрение проектируемого устройства обеспечивает сокращение внеплановых простоев состава вагонов-хопперов и отказ от опасных для человеческого здоровья работ, связанных с очисткой бункеров. Экономический расчет подтверждает целесообразность проводимых мероприятий по реинжинирингу вагонов-хопперов в условиях современного металлургического производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Ефремов Д.Б., Степанов В.М., Чиченева О.Н. Модернизация механизма быстрого отжима валков прокатной клетки ДУО стана 2800 АО «Уральская Сталь» // Сталь. 2020. № 8. С. 44–47.
2. Нефедов А.В., Свичкар В.В., Чиченева О.Н. Реинжиниринг скипового подъемника для загрузки печи литейного отделения ЗАО «РИФАР» // Сталь. 2020. № 7. С. 50–53.
3. Нефедов А.В., Китанов А.А., Чиченев Н.А. Реинжиниринг роликовой закалочной машины листопркатного цеха АО «Уральская Сталь» // Черные металлы. 2022. № 3. С. 22–26. <https://doi.org/10.17580/chm.2022.05.04>
4. Нефедов А.В., Танчук А.В., Чиченев Н.А. Модернизация привода опрокидывателя рудных вагонеток Донского ГОК АО «ТНК Казхром» // Горный журнал. 2022. № 8. С. 52–56. <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.08.07>
5. Chichenev N.A., Chicheneva O.N., Karfidov A.O., Pashkov A.N. Selection of laser processing parameters for hot stamping tools based on mathematical planning of the experiment // CIS Iron and Steel Review. 2021. Vol. 22. P. 37–40. <https://doi.org/10.17580/cisisr.2021.02.07>
6. Майрхофер А., Фартьль Ф., Рорхофер А., Штоль К. Мониторинг состояния оборудования при производстве стали // Черные металлы. 2018. № 9. С. 28–33.
7. Bardovskiy A.D., Gorbatyuk S.M., Keropyan A.M., Bibikov P.Ya. Assessing parameters of the accelerator disk of a centrifugal mill taking into account features of particle motion on the disk surface // Journal of Friction and Wear. 2018. Vol. 39. No. 4. P. 326–329. <https://doi.org/10.3103/S1068366618040037>
1. Efremov D.B., Stepanov V.M., Chicheneva O.N. Modernization of rapid pressing of DUO rolling stand rolls in mill 2800 of JSC Ural Steel. *Stal'*. 2020, no. 8, pp. 44–47. (In Russ.).
2. Nefedov A.V., Svichkar' V.V., Chicheneva O.N. Reengineering of skip lift for loading the furnace in foundry shop of JSC RIFAR. *Stal'*. 2020, no. 7, pp. 50–53. (In Russ.).
3. Nefedov A.V., Kitanov A.A., Chichenev N.A. Reengineering of the roller hardening machine of the sheet-rolling shop of JSC Ural Steel. *Chernye metally*. 2022, no. 3, pp. 22–26. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/chm.2022.05.04>
4. Nefedov A.V., Tanchuk A.V., Chichenev N.A. Modification of car tippler drive at Donskoy Ore Mining and Processing Plant. *Gornyi zhurnal*. 2022, no. 8, pp. 52–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2022.08.07>
5. Chichenev N.A., Chicheneva O.N., Karfidov A.O., Pashkov A.N. Selection of laser processing parameters for hot stamping tools based on mathematical planning of the experiment. *CIS Iron and Steel Review*. 2021, vol. 22, pp. 37–40. <https://doi.org/10.17580/cisisr.2021.02.07>
6. Mairkhofer A., Fartl' F., Rorkhofer A., Shtol' K. Condition monitoring of equipment in steel production. *Chernye metally*. 2018, no. 9, pp. 28–33. (In Russ.).
7. Bardovskiy A.D., Gorbatyuk S.M., Keropyan A.M., Bibikov P.Ya. Assessing parameters of the accelerator disk of a centrifugal mill taking into account features of particle motion on the disk surface. *Journal of Friction and Wear*. 2018, vol. 39, no. 4, pp. 326–329. <https://doi.org/10.3103/S1068366618040037>

8. Nefedov A.V., Svichkar V.V., Chicheneva O.N. Re-engineering of equipment to feed the melting furnace with aluminum charge // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021. P. 1198–1204. http://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_139
9. Чиченев Н.А. Реинжиниринг устройства для центрирования сляба в клету обжимного стана // *Металлург*. 2018. № 7. С. 76–80. <https://10.1007/s11015-018-0711-1>
10. Горбатюк С.М., Зарапин А.Ю., Чиченев Н.А. Модернизация вибрационного грохота горнорудного общества «Катока» (Ангола) // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018. № 1. С. 143–149.
11. Горбатюк С.М., Морозова И.Г., Наумова М.Г. Разработка рабочей модели процесса реиндустриализации производства термической обработки штамповых сталей // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 5. С. 410–415. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-5-410-415>
12. Самусев С.В., Фадеев В.А., Сидорова Т.Ю. Разработка эффективных калибровок формовки листовой заготовки для производства прямошовных электросварных труб малого и среднего диаметров // *Металлург*. 2020. № 7. С. 55–57.
13. Секретов М.В., Губанов С.Г. Экспериментальное исследование нагрузок в приводе вертикальной пильной рамы штрипсового станка // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019. № 1. С. 154–161.
14. Еронько С.П., Горбатюк С.М., Ошовская Е.В., Стародубцев Б.И. Разработка автоматической системы газодинамической отсечки конечного шлака для конвертера с вращающимся корпусом // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2017. № 11. С. 863–869. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-11-863-869>
15. Gorbatyuk S.M., Pashkov A.N., Morozova I.G., Chicheneva O.N. Technologies for applying Ni-Au coatings to heat sinks of SiC-Al metal matrix composite material // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 38. Part 4. P. 1889–1893. <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.581>
16. Busygin A.M., Stelmakhov A.A. Mathematical model for determining kinematic parameters of a bulldozer ripper mechanism // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2022. P. 131–141. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14125-6_14
17. Rumyantsev M.I. Some approaches to improve the resource efficiency of production of flat rolled steel // *CIS Iron and Steel Review*. 2016. No. 2. P. 32–36. <https://doi.org/10.17580/cisisr.2016.02.07>
18. Bridgwater J. Mixing of powders and granular materials by mechanical means – A perspective // *Particuology*. 2012. Vol. 10. No. 4. P. 397–427. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2012.06.002>
19. Weinekötter R., Gericke H. *Mixing of Solids*. Kluwer Academic Publishers, 2000. 156 p.
20. Dubey A. Powder flow and blending // *Predictive Modeling of Pharmaceutical Unit Operations*. 2017. P. 39–69.
21. Rogers A., Lerapetritou M.G. Discrete element reduced-order modeling of dynamic particulate systems // *American Institute of Chemical Engineers Journal*. 2014. Vol. 60. No. 9. P. 3184–3194. <https://doi.org/10.1002/aic.14505>
22. Bradley R.K. Education in plastics manufacturing: Aluminum mold making and injection molding // *International Journal of Mechanical Engineering Education*. 2022. Vol. 50. No. 3. P. 726–738. <http://doi.org/10.1177/03064190211051105>
23. ГОСТ 19903-74. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент. Москва: Стандартинформ, 2005. 18 с.
24. ГОСТ 977-88. Отливки стальные. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ, 2004. 36 с.
25. ГОСТ 5632–2014. Легированные нержавеющие деформируемые стали и сплавы коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. Москва: Стандартинформ, 2005. 54 с.
26. ГОСТ 2319-81. Цепи круглозвенные и тяговые нормальной прочности. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ, 2004. 14 с.
27. ГОСТ 8509-93. Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент. Москва: Стандартинформ, 2005. 12 с.
8. Nefedov A.V., Svichkar V.V., Chicheneva O.N. Re-engineering of equipment to feed the melting furnace with aluminum charge. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2021, pp. 1198–1204. http://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_139
9. Chichenev N.A. Reengineering of the slab-centering unit of a roughing mill stand. *Metallurgist*. 2018, vol. 62, no. 7–8, pp. 701–706. <https://10.1007/s11015-018-0711-1>
10. Gorbatyuk S.M., Zharapin A.Yu., Chichenev N.A. Modernization of vibration rumble of “Katoka” Mining Society (Angola). *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2018, no. 1, pp. 143–149. (In Russ.).
11. Gorbatyuk S.M., Morozova I.G., Naumova M.G. Development of the working model of production reindustrialization of die steel heat treatment. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 5, pp. 410–415. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-5-410-415>
12. Samusev S.V., Fadeev V.A., Sidorova T.Yu. Development of effective roll-pass designs for production of longitudinally welded pipes of small and medium diameters. *Metallurgist*. 2020, vol. 64, no. 7–8, pp. 658–664. <https://doi.org/10.1007/s11015-020-01042-4>
13. Sekretov M.V., Gubanov S.G. Experimental research of vertical feed drive loads in saw frame of strip sawing machine. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2019, vol. 2019, no. 1, pp. 154–161. (In Russ.).
14. Eron'ko S.P., Gorbatyuk S.M., Oshovskaya E.V., Starodubtsev B.I. Development of automatic system of gas-dynamic cut-off of slag for converter with rotating vessel shell. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 11, pp. 863–869. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-11-863-869>
15. Gorbatyuk S.M., Pashkov A.N., Morozova I.G., Chicheneva O.N. Technologies for applying Ni-Au coatings to heat sinks of SiC-Al metal matrix composite material. *Materials Today: Proceedings*. 2021, vol. 38, part 4, pp. 1889–1893. <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.581>
16. Busygin A.M., Stelmakhov A.A. Mathematical model for determining kinematic parameters of a bulldozer ripper mechanism. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2022, pp. 131–141. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14125-6_14
17. Rumyantsev M.I. Some approaches to improve the resource efficiency of production of flat rolled steel. *CIS Iron and Steel Review*. 2016, no. 2, pp. 32–36. <https://doi.org/10.17580/cisisr.2016.02.07>
18. Bridgwater J. Mixing of powders and granular materials by mechanical means – A perspective. *Particuology*. 2012, vol. 10, no. 4, pp. 397–427. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2012.06.002>
19. Weinekötter R., Gericke H. *Mixing of Solids*. Kluwer Academic Publishers, 2000, 156 p.
20. Dubey A. Powder flow and blending. In: *Predictive Modeling of Pharmaceutical Unit Operations*. 2017, pp. 39–69.
21. Rogers A., Lerapetritou M.G. Discrete element reduced-order modeling of dynamic particulate systems. *American Institute of Chemical Engineers Journal*. 2014, vol. 60, no. 9, pp. 3184–3194. <https://doi.org/10.1002/aic.14505>
22. Bradley R.K. Education in plastics manufacturing: Aluminum mold making and injection molding. *International Journal of Mechanical Engineering Education*. 2022, vol. 50, no. 3, pp. 726–738. <http://doi.org/10.1177/03064190211051105>
23. GOST 19903-74. Hot-rolled flat products. Assortment. Moscow: Standartinform, 2005, 18 p. (In Russ.).
24. GOST 977-88. Steel castings. General specifications. Moscow: Standartinform, 2004, 36 p. (In Russ.).
25. GOST 5632–2014. Alloy stainless deformable steels and alloys – corrosion-resistant, heat-resistant and heat-resistant. Grades. Moscow: Standartinform, 2005, 54 p. (In Russ.).
26. GOST 2319-81. Round link and traction chains of normal strength. General specifications. Moscow: Standartinform, 2004, 14 p. (In Russ.).
27. GOST 8509-93. Steel hot-rolled equilateral corners. Assortment. Moscow: Standartinform, 2005, 12 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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

Татьяна Глебовна Шкурко, студент, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС»
E-mail: nfmisis@yandex.ru

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

Николай Алексеевич Чиченев, д.т.н., профессор кафедры инжиниринга технологического оборудования, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
ORCID: 0000-0002-9019-4675
E-mail: chich38@mail.ru

Nikolai A. Chichenev, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair “Engineering of Technological Equipment”, National University of Science and Technology “MISIS”
ORCID: 0000-0002-9019-4675
E-mail: chich38@mail.ru

Наталья Валерьевна Холодова, руководитель производственной практики учебного отдела, Выксунский филиал НИТУ «МИСиС»
E-mail: nv.kholodova@misis.ru

Natalia V. Kholodova, Head of Industrial Practice of the Educational Department, Vyksa Branch of the National University of Science and Technology “MISIS”
E-mail: nv.kholodova@misis.ru

Вклад авторов

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

А. В. Нефедов – идея работы, научное руководство.
Т. Г. Шкурко – анализ результатов исследований, формирование выводов, окончательное редактирование текста.
Н. А. Чиченев – поиск и анализ публикаций, входящих в наукометрические базы.
Н. В. Холодова – окончательное редактирование текста и формирование библиографического списка.

A. V. Nefedov – formation of the main idea of the work, scientific guidance.
T. G. Shkurko – analysis of the research results, formation of the conclusions, final editing of the text.
N. A. Chichenev – search and analysis of publications in scientometric databases.
N. V. Kholodova – final editing of the text, formation of references.

Поступила в редакцию 17.10.2022
 После доработки 20.10.2022
 Принята к публикации 22.10.2022

Received 17.10.2022
 Revised 20.10.2022
 Accepted 22.10.2022



Оригинальная статья

УДК 669.1

DOI 10.17073/0368-0797-2022-11-831-836

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2428>

СОВЕТСКАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ ГЛАЗАМИ АМЕРИКАНСКИХ МЕТАЛЛУРГОВ: ВТОРАЯ ПОЛОВИНА 1950-х гг. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ – СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

В. В. Запарий¹, Вас. В. Запарий^{1,2}, О. Ю. Шешуков^{1,3}¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19)² Институт истории и археологии УрО РАН (Россия, 620990, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 16)³ Институт металлургии УрО РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

Аннотация. В статье раскрывается одна небольшая страница из истории развития металлургической науки и техники в Советском Союзе. Речь идет об установлении научных контактов между американскими и советскими учеными металлургами во второй половине 1950-х гг. Успехи СССР в космической гонке продемонстрировали странам Запада реальную научную и экономическую мощь страны, показав неконструктивность политики изоляции и выгоды экономического сотрудничества. Американским специалистам не без удивления открылся высокий уровень развития металлургической науки и техники в СССР. Уральский политехнический институт был одним из тех вузов, которые посетили американские гости. Именно этой странице истории и посвящена данная статья, она является продолжением материала, опубликованного ранее.

Ключевые слова: металлургия, наука, промышленность, инженерия, советско-американские отношения, научно-исследовательские институты, высшее техническое образование

Для цитирования: Запарий В.В., Запарий Вас.В., Шешуков О.Ю. Советская металлургия глазами американских металлургов: вторая половина 1950-х гг. Металлургическое образование – сравнительный анализ // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 11. С. 831–836. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-831-836>

Original article

SOVIET METALLURGY IN THE EYES OF AMERICAN METALLURGISTS: THE SECOND HALF OF THE 1950s. METALLURGICAL EDUCATION – COMPARATIVE ANALYSIS

V. V. Zaparii¹, Vas. V. Zaparii^{1,2}, O. Yu. Sheshukov^{1,3}¹ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)² Institute of History and Archeology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (16 S. Kovalevskoi Str., Yekaterinburg 620990, Russian Federation)³ Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

Abstract. The article reveals one small page from the history of development of metallurgical science and technology in the Soviet Union. We describe the establishment of scientific contacts between American and Soviet metallurgical scientists in the second half of the 1950s. The successes of the USSR in the space race demonstrated to the Western countries the real scientific and economic power of the country, showing the unconstructiveness of the policy of isolation and the benefits of economic cooperation. American specialists discovered the high level of development of metallurgical science and technology in the USSR. Ural Polytechnical Institute (UPI) was one of those universities visited by American guests. This article is devoted to this page of the history; it is a continuation of the authors' material published earlier.

Keywords: metallurgy, science, industry, engineering, Soviet-American relations, research institutes, higher technical education

For citation: Zaparii V.V., Zaparii Vas.V., Sheshukov O.Yu. Soviet metallurgy in the eyes of American metallurgists: the second half of the 1950s. Metallurgical education – comparative analysis. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 11, pp. 831–836. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-11-831-836>

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия достойное место в исторической науке заняло такое направление, как живая история, в большой степени представляющая мнение простых граждан, а вовсе не профессиональных историков, на исторические процессы. Интересной страницей в этом направлении является восприятие американскими металлургами достижений советской металлургии в середине – второй половине 1950-х гг., когда сотрудничество в этой области между нашими странами только начиналось.

Это нашло отражение в целом ряде публикаций американских металлургов, практиков и ученых, побывавших в нашей стране, которые опубликовали свои статьи в американских технических журналах. Данные работы отражали общий технико-технологический уровень развития советской металлургии и металлургической науки, давали характеристику советской системе подготовки инженерных кадров, постоянно сравнивая реалии СССР с собственным опытом и достижениями¹.

Как отмечено в предыдущей публикации [1], в Советском Союзе существовала система реферативных журналов для перевода наиболее интересных специализированных статей из зарубежных изданий по различным отраслям знания. Это касалось и металлургии. Переводы готовили важные государственные организации, в частности Центральная научно-техническая библиотека ЦНИИ черной металлургии во взаимодействии с ГЛАВНИИПРОЕКТ при ГОСПЛАНЕ СССР. В составе этой организации работала группа профессиональных переводчиков, которые отбирали и переводили аналитические статьи из зарубежных журналов. Один из таких переводов² и рассматривается в данной статье. В нем приводятся впечатления американских металлургов, опубликованные в металлургическом журнале США (*Journal of Metals*) [2]. В продолжение темы авторы считают интересным показать сравнение американцами металлургического образования в СССР и США. “*Journal of Metals*” предлагает читателям обзор статей трех профессоров Массачусетского технологического института (МТИ), побывавших в СССР в 1957 г. Это профессора Д. Чипмен, Н. Грант, М. Кохен.

¹ Следует оговориться, что такое сотрудничество существовало между металлургами СССР и США в 1920 – 1930 гг., о чем напомнил авторам статьи Ю.А. Король, который был неофициальным рецензентом предыдущей статьи. Он справедливо напомнил, что «с 1925 по 1935 г. многие наши инженеры и руководители промышленности были по приглашениям в Америке и знакомились с работой всех предприятий без ограничения в информации и посещениях. После войны ситуация поменялась, и мы догнали по развитию американцев, более того, и им стало, что посмотреть у нас».

² Перевод № 4161. Отдел библиографии. Центральная научно-техническая библиотека ЦНИИ черной металлургии. ГЛАВНИИПРОЕКТ при ГОСПЛАНЕ СССР. Переводчик Н.А. Смолянинов. 76 с.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основе методологии исследования лежит проблемно-хронологический подход, который позволяет, опираясь на цитируемый источник, достоверно воссоздать картину научно-технического сотрудничества в области металлургии между США и СССР во второй половине 1950-х гг. и интерпретировать ее в исторической ретроспективе. Работа построена на признании принципа объективности, положенного в основу подхода к интерпретации причинно-следственных закономерностей развития исторических событий и явлений. В дополнение используются методы анализа документов и научной литературы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В статье «Металлургическое образование в СССР» Д. Чипмен и Н. Грант уделили особое внимание Московскому институту черной металлургии. Профессора утверждали, что поступившие на первый курс студенты в СССР имели очень хорошую подготовку, которую приобретали в средней школе, где они около трех лет углубленно изучали химию, физику и математику, а также по меньшей мере один иностранный язык. До 80 % учащихся выбирали английский язык, остальные немецкий или французский. Первые три года обучения в институте являлись общеобразовательными. Студенты изучали математику, химию, физику, статику и динамику, сопротивление материалов и продолжают изучение иностранного языка. Искусствам и гуманитарным наукам особого внимания не уделялось. Гуманитарная составляющая была представлена изучением истории коммунистической партии в течение одного года, политической экономии два года и философии один год. В последние два года обучения занятия высоко специализированы. Студент может специализироваться в дальнейшем по производству чугуна, стали, электропечам или прокатным станам. Избранная специальность становится областью его производственной практики в летний период и темой дипломной работы.

Авторы статьи подчеркивают, что далеко не каждый желающий может попасть в институт, так как они заполнены, число желающих превышает число поступивших в три – пять раз. Поэтому прием проводится по конкурсным экзаменам. Учебная нагрузка представлялась американской профессуре значительной. На лекции и лабораторные работы затрачивается не менее шести академических часов в день. Кроме того, необходимы дополнительные занятия, однако их объем меньше, чем в американских учебных заведениях.

Студенты получают стипендию, если доход семьи не достигает 600 руб. в месяц на человека. В противном случае студента должна содержать его семья. В течение первого года обучения стипендия составляет 300 – 400 руб. в месяц. Сумма 300 руб. в месяц считает-

ся голым прожиточным минимумом. Комнаты в общежитии исключительно дешевы, а питание в столовых обходится студенту от 10 до 15 руб. в день. С каждым годом стипендия повышается на 50 руб. и на пятом году обучения достигает 600 руб. в месяц. Аспиранты получают около 1000 руб. в месяц, выпускник вуза поступает на промышленное предприятие, где ему устанавливается оклад в 800 – 1000 руб. в месяц, однако через несколько лет его заработок возрастает до 5000 руб. в месяц.

Рассматривая пример Московского института стали им. И.В. Сталина, они подчеркивают его учебный характер. Сообщают, что данное учебное заведение возникло на базе прежней Горной академии и на этой территории находятся институты Стали, Горный, Нефти, Торфяной и Геолого-разведочный. Американские профессора отмечали, что число студентов в институте Стали все последние годы продолжало увеличиваться, достигнув 2500 человек. В институте работало 240 преподавателей, в том числе 50 профессоров, 120 ассистентов. По оснащенности оборудованием и подбору преподавательского состава он являлся одним из ведущих металлургических вузов страны. Студенты обучались на трех факультетах: металлургическом, технологическом и физико-химико-механическом (рис. 1).

На первом факультете изучали доменное и конвертерное производство, металлургию стали, включая мартеновское и электросталеплавильное производство, литейное производство, а также тяжелое машиностроение и печные технологии. На втором факультете изучали прокатку, ковку, производство металлоизделий и термическую обработку. Студенты третьего факультета изучали физическую химию производства стали, физику металлов или металловедение. Ежегодно выпускалось 4500 специалистов в области черной металлургии, порядка 115 человек получали ученую степень канди-

дата наук. В Московском институте черной металлургии им. Сталина американским металлургам сообщили, что страна хорошо обеспечена специалистами во всех областях науки и техники. По советским данным, дипломы высших учебных заведений в стране получали до 80 тыс. человек в год (рис. 2).

В результате были сделаны выводы о том, что система подготовки в СССР существенно отличается от американской программы металлургического образования более углубленной специализацией в течение двух последних лет обучения, а также наличием обязательной производственной практики на производстве.

Американские специалисты полагали, что программы первых трех лет обучения в вузах США и СССР можно считать относительно аналогичными, но на четвертом курсе советские студенты проходят курс обучения и выполняют работы на производстве. Такое обучение не требуется от американских студентов даже в так называемых практических школах и в случае кооперированных программ обучения. Подготовка в течение этих двух лет в значительной мере относится к дисциплинам, которые американские студенты должны изучать уже после окончания учебного заведения при поступлении на работу. Последние два года обучения в СССР отводятся скорее подготовке к работе в промышленности, нежели непосредственно образованию. Этому пути лучшие учебные заведения в США, по большей части, избегали.

Едва ли можно сомневаться, говорят американские профессора, что подготовка советских студентов по выбранной ими специальности хороша. Несомненно, все они, или почти все, будут трудоустроены в ту отрасль промышленности, для которой их готовят. Эта ситуация совершенно отличается от практики в США, где молодой человек, получивший диплом, может выбрать любую из нескольких дюжин отраслей производ-



Рис. 1. Вид на здание московского института стали им. И. В. Сталина, конец 40-х – начало 50-х годов XX в.

Fig. 1. View of the building of the Stalin Moscow Institute of Steel, 1940s – early 1950s

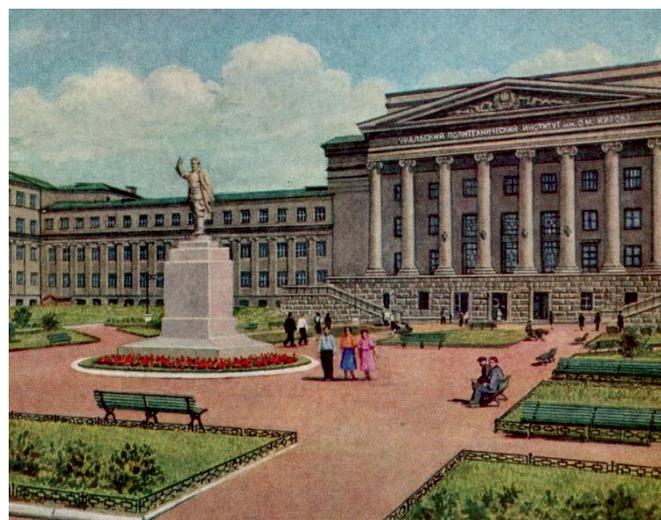


Рис. 2. Уральский политехнический институт, 1950-е гг.

Fig. 2. Ural Polytechnic Institute, 1950s

ства. Закончивший советский ВУЗ инженер-металлург имеет ясное представление о той работе, которую ему предстоит выполнять на производстве (рис. 3), в результате чего эффективность первого года его работы в промышленности выше, чем в США. Однако американские специалисты сомневались, что получаемая в СССР узкая подготовка окажется эффективной для работы во все более усложняющихся условиях. Просто принятый у нас порядок способствовал скорейшему постижению высот в профессии.

Американские специалисты предполагали, что диплом советского инженера примерно эквивалентен степени магистра в США. Некоторая нестыковка возникает в том, что, по мнению американцев, степень магистра предполагает более широкую, чем у инженера, специализацию. Вероятно, следует понимать, что степень магистра требует значительно более широкого образования, а для получения диплома инженера необходима узкая практическая подготовка.

Подводя итоги, американские специалисты отметили, что в СССР программа обучения на металлургических специальностях в целом приспособлена к потребностям национальной промышленности. Каждый студент подготовлен к специфической работе в конкретной отрасли промышленности, а выпускники соответствуют запросам промышленности, в результате чего и создается впечатление, что диплом инженера-металлурга служит неременным условием для продвижения в карьере. Степень специализации и объем подготовки значительно выше принятых в американской практике. Широта образования в значительной мере приносится в жертву специализированной подготовке. Однако, по их мнению, такую жертву нельзя рекомендовать американским учебным заведениям. Количественно Советский Союз значительно опередил Америку в области подготовки металлургов. В аме-

риканских учебных заведениях металлургии следует уделять большее внимание, необходимо также приложить дальнейшие усилия для привлечения большего числа лучших студентов. Лабораторное оборудование, используемое для обучения металлургов в советских учебных заведениях, лучше, чем то, что есть в американских. Это относится как к его качеству, так и к количеству. Отмечены разнообразие и передовой характер лабораторных работ, для которых это оборудование предназначено.

В развитие этой темы редакция журнала задала профессору М. Кохену несколько вопросов о его впечатлении от знакомства с техническим образованием в СССР. Общий вывод можно сформулировать одной фразой – «русские готовят хороших инженеров». У редакции журнала сложилось впечатление, что в Советском Союзе готовят скорее квалифицированных техников, а не образованных инженеров. Что технические училища, тесно связанные с производством, стремятся готовить специалистов для определенной работы почти на каждом заводе. Не приводит ли это к выпуску инженеров весьма узкого профиля, не способных приспособиться к новым ситуациям и различным идеям и проблемам?

Профессор М. Кохен не согласился с такой трактовкой и отметил, что советская система образования представляет собой единое целое, поэтому необходимо учитывать знания, приобретенные в начальной и средней школе. Именно в средней школе потенциальный инженер начинает изучение основ математики, физики, химии. Кроме того, он изучает основные и прикладные науки в течение первых двух – трех лет обучения в техническом вузе. Специализироваться в относительно узкой области он начинает только в течение двух последних лет обучения. Именно в результате постепенного накопления основных знаний за десять лет обучения в начальной и средней школах, а также в техническом вузе, получается инженер с достаточно полным образованием. В итоге Советский Союз имеет хорошо «общеобразованных» инженеров.

Что касается гуманитарных наук, то им уделяется меньше внимания, чем в Америке, однако полностью ими не пренебрегают. Американский профессор отмечал, что основную программу гуманитарного обучения они (студенты в СССР) изучают еще в школе. Это относится к таким дисциплинам, как литература, история, география, искусство и музыка. Видимо, по мнению советских педагогов, достигнув университетского уровня, студент в значительной мере закончил эту фазу своего образования. Экономика, иностранные языки, физическая культура, философия, марксизм-ленинизм являются единственными не техническими дисциплинами, преподаваемыми в техническом вузе. Ничего, похожего на преподавание свободных искусств, в советских университетах не существует, хотя студент может специализироваться по истории, экономическим наукам и другим отраслям знаний.



Рис. 3. Кузнецкий металлургический комбинат

Fig. 3. Kuznetsk Metallurgical Combine

Большинство из тех, кого встречали члены делегации несомненно умели читать по-английски, хотя только немногие могли говорить без переводчика. Это происходило потому, что в течение шести лет его преподавали в школах и еще пять лет в вузе. Причем особое внимание уделялось английскому языку, хотя определенная часть изучала немецкий и французский язык.

Интересны замечания профессора М. Кохена о том, насколько среднее образование в СССР совместимо с американским. По его сведениям, в советской школе ученикам не предоставляется столь широкого выбора факультативных предметов, которые американские ученики могут изучать в любое время и почти в любой последовательности. Каждый предмет в советской школе вводится в том порядке, который признается правильным. Для поступления в высшее учебное заведение обязательны вступительные экзамены. Все они проводятся на одном уровне и требуют основательных знаний математики и естественных наук для поступления в технические вузы. Кроме того, обязательны русский и иностранный языки.

Отмечено и отношение студентов к преподавательскому составу, которое, как и в германских вузах, характеризуется большим уважением. М. Кохен специально остановился на экономическом положении советской профессуры, отметив, что профессура университетов, несомненно, находится на верхушке экономической, а также социальной лестницы, а их заработки в десять – пятнадцать раз выше, чем у рабочих. Поэтому недостатка в преподавателях не ощущается. Высшее образование, по мнению американских специалистов, привлекательно для советской молодежи еще и тем, что стипендия студента соизмерима с зарплатой неквалифицированного рабочего. В заключение отмечено, что американской делегации в СССР была предоставлена исключительно полная возможность для посещения научно-исследовательских и учебных институтов, возможность беседовать со специалистами в различных областях. Поэтому М. Кохен предполагал, что с обеих сторон имеются хорошие перспективы для постепенного «открытия дверей».

Как резюме, было высказано мнение, что советские инженеры не являются чрезмерно специализированными в своей области, если иметь в виду объем преподавания основных и прикладных научных дисциплин

в средней школе и общеобразовательных дисциплин в течение первых двух лет обучения в вузе. Кроме того, преподавание естественных наук и техники прочно закреплено в системе образования СССР, которую следует рассматривать целостно, где высшее образование является частью интегрированной системы. Поэтому каждый ученик средней школы должен пройти основательный курс обучения естественным наукам и математике. В процессе высшего образования будущих инженеров гуманитарное образование фактически отсутствует, очевидно, в надежде на школьный багаж обучающихся в этой области. Таким образом, американские специалисты нашли много нового и интересного в имевшейся тогда в нашей стране системе высшего металлургического образования. Был сделан главный позитивный вывод о необходимости международного сотрудничества в этой области между нашими странами, вывод, который продолжает оставаться актуальным и сегодня, несмотря на политические противоречия.

Выводы

На современном этапе российская металлургия демонстрирует устойчивое развитие, постепенное технико-технологическое перевооружение, опираясь на научно-технический и инфраструктурный фундамент, заложенный в советский период. Ее продукция не только обеспечивает оборонное производство страны, но и занимает прочные позиции на мировом рынке металлов, конкурируя с такими крупными экспортерами, как Индия, Китай и Турция. Однако усиление глобально-политического противостояния последних лет, различные режимы экономических ограничений, вводимых против России и ее промышленности западными странами, подрывают рыночные отношения во всем мире, тормозят развитие науки и техники. Сворачивание программ международного сотрудничества в области металлургии со специалистами из экономически развитых стран не может принести никакого позитивного эффекта, как показывают исторические события предыдущей эпохи. Однако те же примеры прошлого показывают, что такие контакты неизбежно порождают синергетический эффект в деле развития науки и промышленной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Запарий В.В., Запарий Вас.В., Шешуков О.Ю. Советская металлургия глазами американских металлургов: вторая половина 1950-х гг. // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 1. С. 5–9. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-5-9>
2. Soviet steel news, reported by AIME members visiting USSR // Journal of Metals. 1958. III. Vol. 10. No. 3. P. 161, 163, 165–186.
1. Zaparii V.V., Zaparii Vas.V., Sheshukov O.Yu. Soviet metallurgy in the eyes of American metallurgists: the second half of the 1950s. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 65, no. 1, pp. 5–9. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-1-5-9>
2. Soviet steel news, reported by AIME members visiting USSR. *Journal of Metals*. 1958, III, vol. 10, no. 3, pp. 161, 163, 165–186.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Васильевич Запарий, д.ист.н., профессор кафедры истории России Уральского гуманитарного института, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

ORCID: 0000-0002-3326-4796

E-mail: vvzap@mail.ru

Василий Владимирович Запарий, к.ист.н., доцент кафедры теории методологии и правового обеспечения государственного и муниципального управления Института экономики и управления, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, научный сотрудник, Институт истории и археологии УрО РАН

ORCID: 0000-0003-2716-2336

E-mail: pantera.zap@gmail.com

Олег Юрьевич Шешуков, д.т.н., профессор, директор Института новых материалов и технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, главный научный сотрудник лаборатории порошковых, композиционных и наноматериалов, Институт металлургии УрО РАН

E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

Vladimir V. Zaparii, Dr. Sci. (Hist.), Prof. of the Chair of Russian History of Ural Institute of Humanities, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

ORCID: 0000-0002-3326-4796

E-mail: vvzap@mail.ru

Vasilii V. Zaparii, Cand. Sci. (Hist.), Assist. Prof. of the Chair of Theory of Methodology and Legal Support of State and Municipal Management of the Institute of Economics and Management, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Research Associate, Institute of History and Archeology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

ORCID: 0000-0003-2716-2336

E-mail: pantera.zap@gmail.com

Oleg Yu. Sheshukov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Chief Researcher of the Laboratory of Powder, Composite and Nano-Materials, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

Поступила в редакцию 08.04.2022

После доработки 20.04.2022

Принята к публикации 25.04.2022

Received 08.04.2022

Revised 20.04.2022

Accepted 25.04.2022



К 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ РАЗИКОВА МИХАИЛА ИВАНОВИЧА



Михаил Иванович Разиков, профессор кафедры «Технология сварочного производства», научный руководитель организованной им отраслевой лаборатории наплавки, заведующий созданной им кафедры «Металлургия сварки» (УПИ, Свердловск, ныне УрФУ, Екатеринбург) основал и создал в 1960 – 1970-е годы принципиально новое научное направление. Оно заключалось в разработке сварочных и наплавочных материалов с высокой способностью к деформационному упрочнению и релаксации напряжений вследствие пластичности, наведенной превращением метастабильного аустенита в мартенсит. Пионерские работы металлургов Р.И. Минца и И.Н. Богачева в 1950-х годах показали исключительно высокую кавитационную стойкость нестабильных аустенитных хромомарганцевых сталей. М.И. Разиков в творческом содружестве с этими учеными вывел полученные теоретические результаты на уровень широкого практического применения. Были разработаны составы электродов и порошковых проволок, технологии и оборудование для сварки и наплавки

этого принципиально нового класса сталей. М.И. Разиков обладал обширными профессиональными знаниями, острым чувством нового, организаторским талантом, незаурядной смелостью и энергией. Под его руководством коллектив специалистов разработал гамму сварочных материалов, которые по износостойкости покрытий из них, находящихся в контакте с твердыми, жидкими и газообразными средами, не имеют равных и в настоящее время. Также был разработан комплекс установок и методик испытаний покрытий, технологий наплавки. На этой основе реализован ряд крупных проектов для предприятий тяжелого машиностроения (Уралмаш), черной (металлургический комбинат и метизно-металлургический завод в Магнитогорске) и цветной (заводы ОЦМ в Каменск-Уральском, Ревде) металлургии, горной промышленности (Ачинский глиноземный комбинат, золотодобывающие предприятия в Якутии и Магадане, Казцветметремонт).

Внезапная кончина Михаила Ивановича в 52 года потрясла всех, кто знал этого жизнелюбимого человека неумной творческой энергии. Воздадим должное замечательному инженеру и ученому, сделавшему за свою недолгую жизнь так много для отечественной науки. Он воспитал учеников, в том числе более 20 кандидатов наук, которые обязаны ему плодотворным научным направлением, творческим зарядом, удавшимися научными карьерами. Новаторские направления в русле идей М.И. Разикова получили и получают эффективное развитие под руководством известных ученых в области сварки и металловедения, профессоров В.Н. Бороненкова, М.И. Зиниграда, Ю.С. Коробова, М.П. Шалимова, Н.В. Королёва, В.И. Шумякова, Б.А. Потехина, М.А. Филиппова, Л.С. Малинова, Л.Г. Коршунова, А.В. Макарова, специалистов А.М. Фивейского, Н.М. Разикова, А.Н. Балина и других. Разработки, заложенные выдающимся ученым-сварщиком и металлургом Михаилом Ивановичем Разиковым в УрФУ, реализованы в электродах, порошковых проволоках, технологиях их использования с применением дуговой и лазерной наплавки/сварки, газотермического напыления для защиты от абразивного и адгезионного износа, кавитации. Они применяются на многих предприятиях России, Бразилии, Германии, США, Украины и других стран, принося значимые результаты в производстве.

Над номером работали:

Леонтьев Л.И., *главный редактор*

Ивани Е.А., *заместитель главного редактора*

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

Долицкая О.А., *научный редактор*

Расенец В.В., *верстка, иллюстрации*

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

Подписано в печать 25.11.2022. Формат 60×90 ¹/₈. Бум. офсетная № 1.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,75. Заказ 16152. Цена свободная.

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

IZVESTIYA

FERROUS METALLURGY

EXPERIMENTAL SIMULATION OF VOLUMETRIC COMPACTS FORMATION FROM SPHERICAL WAXY ELEMENTS

THE CONCEPT OF OPTIMAL BAR ROLL PASS DESIGN. REPORT 4. OPTIMIZATION OF ROLL PASS DESIGN SCHEME

EFFECT OF NATURAL GAS FLOW RATE AND TEMPERATURE ON THE PROCESSES OCCURRING IN A BLAST FURNACE TUYERE WITH HEAT-INSULATING INSERT IN BLAST CHANNEL

DEVELOPMENT OF TEMPERATURE-SPEED MODES OF HOT DEFORMATION OF Co-28Cr-6Mo ALLOY BASED ON PROCESSING MAPS

TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS, PHASE COMPOSITION AND MICROHARDNESS OF SUBSURFACE REGIONS OF WC – (Fe – Mn – C) COMPOSITES AFTER HIGH-SPEED SLIDING ON STEEL

INFLUENCE OF COMPOSITION AND COOLING RATE OF ALUMOCALCIUM SLAG ON ITS CRUMBLABILITY

APPLICATION OF PHYSICAL SIMULATION TO EVALUATE THE IMPACT OF TEEMING METHOD AND RATE ON AXIAL ZONE FORMATION OF LARGE INGOTS

MODERNIZATION OF HOPPER CAR FOR TRANSPORTATION OF AGGLOMERATE AND OTHER MATERIALS

SOVIET METALLURGY IN THE EYES OF AMERICAN METALLURGISTS: THE SECOND HALF OF THE 1950s. METALLURGICAL EDUCATION – COMPARATIVE ANALYSIS

TO THE 100TH ANNIVERSARY OF RAZIKOV MIKHAIL IVANOVICH