



ISSN 2304-4497
eISSN 2307-1710

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Научный журнал

ВЕСТНИК
Сибирского государственного
индустриального университета

№ 1 (47), 2024

Издается с июня 2012 года
Выходит 4 раза в год

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

Scientific journal

BULLETIN
of the Siberian State Industrial University

No. 1 (47), 2024

Published since June 2012
It is published 4 times a year

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации:

ПИ № ФС77-77872 от 03.03.2020 г.

Адрес редакции:

Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, Сибирский государственный индустриальный университет
каб. 433 М, тел. 8-3843-74-86-28
[http: www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru)
e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru

Адрес издателя:

Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, Сибирский государственный индустриальный университет
каб. 336 Г, тел. 8-3843-46-35-02
e-mail: rector@sibsiu.ru

Адрес типографии:

Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, Центральный район, ул. Кирова, зд. 42, Сибирский государственный индустриальный университет
каб. 280 Г, тел. 8-3843-46-44-02

Подписные индексы:

Объединенный каталог «Пресса России» – 41270

Founder

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Siberian State Industrial University»

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (Roskomnadzor)

Certificate of registration:

PI No. FS77-77872 dated **03.03.2020**

Editorial office address:

42 Kirova Str., Central district, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation, Siberian State Industrial University office 433 M, tel. 8-3843-74-86-28
[http: www.sibsiu.ru](http://www.sibsiu.ru)
e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru

Publisher's address:

42 Kirova Str., Central district, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation, Siberian State Industrial University office 336 G, tel. 8-3843-46-35-02
e-mail: rector@sibsiu.ru

Printing house address:

42 Kirova Str., Central district, Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation, Siberian State Industrial University office 280 G, tel. 8-3843-46-44-02

Subscription indexes:

United catalog «Press of Russia» – 41270

Подписано в печать

25.03.2024 г.

Выход в свет

25.03.2024 г.

Формат бумаги 60×88 1/8.

Бумага писчая.

Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,5.

Уч.-изд. л. 5,9.

Тираж 300 экз.

Заказ № 48.

Цена свободная

Signed to the press

25.03.2024

Coming out

25.03.2024

The paper size is 60×88 1/8.

Writing paper.

Offset printing.

Usl. pech. l. 5,5.

Uch.-ed. l. 5,9.

The circulation is 300 copies.

Order no. 48.

The price is free

Редакционная коллегия

Главный редактор

Коновалов Сергей Валерьевич, д.т.н., профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Ответственный секретарь

Запольская Екатерина Михайловна, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Редакционная коллегия:

Агеев Евгений Викторович, д.т.н., профессор, профессор кафедры технологии материалов и транспорта, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

Бецофен Сергей Яковлевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры технологии и системы автоматизированного проектирования металлургических процессов, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

Бурков Владимир Николаевич, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия

Буркова Ирина Владимировна, д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник, Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия

Гречников Федор Васильевич, Академик Российской академии наук, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой обработки металлов давлением, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, г. Самара, Россия

Громов Виктор Евгеньевич, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Данилов Владимир Иванович, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, Россия

Деев Владислав Борисович, д.т.н., профессор, профессор кафедры литейных технологий и художественной обработки материалов, Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, г. Москва, Россия; главный научный сотрудник Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия

Ершова Ирина Геннадьевна, д.э.н., профессор, профессор кафедры финансов и кредита, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

Jayalakshmi Subramanian, PhD, профессор, Технологический институт MLR, г. Хайдарабад, Индия

Жеребцов Сергей Валерьевич, д.т.н., доцент, профессор кафедры материаловедения и нанотехнологий, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Россия

Захарова Александра Александровна, д.т.н., доцент, профессор кафедры автоматизированных систем управления, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, Россия

Затепякин Олег Аркадьевич, д.э.н., доцент, профессор кафедры менеджмента и отраслевой экономики, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Зеркаль Сергей Михайлович, д.т.н., профессор, профессор кафедры вычислительной техники, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Зимин Алексей Валерьевич, д.т.н., заместитель директора по научной и проектной работе института информационных технологий и автоматизированных систем, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Кириенко Анна Павловна, д.э.н., профессор, директор Байкальского института БРИКС, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, профессор кафедры финансового и налогового менеджмента, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Климков Алексей Григорьевич, к.э.н., начальник научно-исследовательского отдела ЗАО «Структурные технологии», г. Минск, Республика Беларусь

Колубаев Евгений Александрович, д.т.н., профессор Российской академии наук, директор, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, Россия

Копеин Валерий Валентинович, д.э.н., доцент, профессор кафедры бухгалтерского учета, налогообложения и финансов, Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия

Коган Антон Борисович, д.э.н., доцент, профессор кафедры экономики предпринимательской деятельности и логистики, Новосибирский государственный университет экономики и управления «НИНХ», г. Новосибирск, Россия

Нехорошева Людмила Николаевна, д.э.н., профессор, заведующий кафедрой экономики промышленных предприятий, Белорусский государственный экономический университет, г. Минск, Республика Беларусь

Namrata Gangil, PhD, доцент кафедры машиностроения, Инженерный колледж Аджая Кумара Гарга, г. Газиабад, Индия

Осколкова Татьяна Николаевна, д.т.н., доцент, профессор кафедры обработки металлов давлением и материаловедения. ЕВРАЗ ЗСМК, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Пантелеев Василий Иванович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электроэнергетики, Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Петрова Татьяна Викторовна, д.э.н., профессор, профессор кафедры менеджмента и отраслевой экономики, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Ramachandra Arvind Singh, PhD, профессор, Технологический институт MLR (MLRI), г. Хайдарабад, Индия

Рыбенко Инна Анатольевна, д.т.н., доцент, профессор кафедры прикладных информационных технологий и программирования, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Симченко Наталья Александровна, д.э.н., профессор, профессор кафедры экономической теории и истории экономической мысли, Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Siddiquee Arshad Noor, PhD, профессор кафедры машиностроения Джамия Миллия Исламия, Центральный университет, г. Нью-Дели, Индия

Смагин Валерий Иванович, д.т.н., профессор, профессор кафедры прикладной математики института прикладной математики и компьютерных наук, Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

Стрижак Павел Александрович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией теплопереноса, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Султангузин Ильдар Айдарович, д.т.н., профессор, профессор кафедры промышленных теплоэнергетических систем, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

Solotareff Stefan, PhD, доктор теоретической физики, профессор психологии-математики, Государственный университет Ужда, Марокко

Темлянец Михаил Викторович, д.т.н., профессор, проректор по учебной работе, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Уманский Александр Александрович, д.т.н., доцент, директор Института металлургии и материаловедения, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Хамзаева Айнура Мураталиевна, к.э.н., доцент, заведующий кафедрой бухгалтерского учета и аудита, Ошский технологический университет им. Академика М.М. Адышева, г. Ош, Кыргызстан

Chen Xizhang, PhD, профессор, профессор университета Вэньчжоу, г. Вэньчжоу, Китай

Чехонадских Александр Васильевич, д.т.н., доцент, профессор кафедры алгебры и математической логики, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Шиплюк Александр Николаевич, член-корреспондент Российской академии наук, д.ф.-м.н., Институт теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия

Юлдашев Носиржон Хайдарович, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физики, Ферганский политехнический институт, г. Фергана, Узбекистан

Юрьев Алексей Борисович, д.т.н., доцент, ректор, Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк, Россия

Members of the editorial board

Chief Editor

Konovalov Sergey Valerievich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research and Innovation, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Executive Secretary

Zapolskaya Ekaterina Mikhailovna, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Editorial team:

Ageev Evgeny Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology of Materials and Transport, Southwestern State University, Kursk, Russia

Betsofen Sergey Yakovlevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technology and Computer-Aided Design of Metallurgical Processes, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Burkov Vladimir Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, V.A. Trapeznikov RAS, Moscow, Russia

Burkova Irina Vladimirovna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher, V.A. Trapeznikov RAS, Moscow, Russia

Gromov Viktor Evgenievich, Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Professor, Head of the Department of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Grechnikov Fedor Vasilyevich, Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Metal Forming, Samara National Research University named after Academician S.P. Koroleva, Samara, Russia

Danilov Vladimir Ivanovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Chief Researcher, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IFPM SB RAS), Tomsk, Russia

Deev Vladislav Borisovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Foundry Technologies and Artistic Processing of Materials, National Research Technological University "MISiS", Moscow, Russia; Chief Researcher, Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletov, Vladimir, Russia

Ershova Irina Gennadievna, Doctor of Economics, Professor, Professor of the Department of Finance and Credit, Southwestern State University, Kursk, Russia

Jayalakshmi Subramanian, PhD, Professor, MLR Institute of Technology, Hyderabad, India

Zherebtsov Sergey Valerievich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Materials Science and Nanotechnology, Belgorod State National Research University (NRU "BelGU"), Belgorod, Russia

Zimin Aleksey Valerievich, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director for Research and Design Work of the Institute of Information Technologies and Automated Systems, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Zakharova Alexandra Alexandrovna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of ACS, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russia

Zatepyakin Oleg Arkadyevich, Doctor of Economics, Associate Professor, Department of Management and Sectoral Economics, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Kiriyyenko Anna Pavlovna, Doctor of Economics, Professor, Director of the Baikal BRICS Institute, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Professor of the Department of Financial and Tax Management, Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

Khamzaeva Ainura Muratalievna, Candidate of Economics, Associate Professor, Head of the Department of Accounting and Auditing, Osh Technological University. Academician M.M. Adysheva, Osh, Kyrgyzstan

Klimkov Aleksey Grigoryevich, Ph.D. in Economics, Head of the Research Department of Closed Joint-Stock Company "Structural Technologies", Minsk, Republic of Belarus

Kopein Valery Valentinovich, Doctor of Economics, Associate Professor, Professor of the Department of Accounting, Taxation and Finance, Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Kogan Anton Borisovich, Doctor of Economics, Associate Professor, Professor of the Department of Business Economics and Logistics, Novosibirsk State University of Economics and Management "NINH", Novosibirsk, Russia

Kolubaev Evgeny Alexandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Director, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

Namrata Gangil, PhD, Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Ajay Kumar Garg Engineering College, Ghaziabad, India

Nehorosheva Lyudmila Nikolaevna, Doctor of Economics, Professor, Head of the Department of Economics of Industrial Enterprises, Belarusian State Economic University, Minsk, Republic of Belarus

Oskolkova Tatyana Nikolaevna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Metal Forming and Metal Science. EVRAZ ZSMK, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Panteleev Vasily Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Power Engineering, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Petrova Tatyana Viktorovna, Doctor of Economics, Professor, Professor of the Department of Management and Sectoral Economics, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Ramachandra Arvind Singh, PhD, Professor, MLR Institute of Technology, Hyderabad, India

Rybenko Inna Anatolyevna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Applied Information Technologies and Programming, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Simchenko Natalya Alexandrovna, Doctor of Economics, Professor, Professor of the Department of Economic Theory and History of Economic Thought, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

Solotareff Stefan, Doctor of Theoretical Physics, Professor of Psychology and Mathematics, State University of Oujda, Morocco

Strizhak Pavel Aleksandrovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory of Heat and Mass Transfer, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Sultanguzin Ildar Aidarovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Industrial Heat and Power Systems, National Research University "MPEI", Institute of Energy Efficiency and Hydrogen Technologies, Moscow, Russia

Siddiquee Arshad Noor, PhD, Professor of Mechanical Engineering Jamia Millia Islamia, Central University, New Delhi, India

Temlyantsev Mikhail Viktorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Academic Affairs, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Umansky Alexander Alexandrovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Metallurgy and Materials Science, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Chen Xizhang, PhD, professor, professor of Wenzhou University. Wenzhou, China

Shiptyuk Alexander Nikolaevich, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Institute of Theoretical and Applied Mechanics named after S.A. Khristianovich Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Yuldashev Nosirjon Khaydarovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Physics, Fergana Polytechnic Institute, Fergana, Uzbekistan

Yuryev Aleksey Borisovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Rector, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

- Серебрякова А.А., Шляров В.В., Загуляев Д.В.** Поведение металлов и сплавов под влиянием магнитного поля9
- Сарычев В.Д., Невский С.А., Грановский А.Ю., Башенко Л.П., Шамсутдинова Д.В.** Модель конвективного теплопереноса в высокоэнтропийных сплавах при электронно-пучковой обработке19
- Чапайкин А.С., Громов В.Е., Чжан П., Иванов Ю.Ф., Крюков Р.Е., Шляров В.В., Семин А.П.** Структурно-фазовые состояния и свойства плазменной наплавки быстрорежущей стали в среде азота35
- Чумаевский А.В., Осипович К.С., Семенчук В.М., Тарасов С.Ю., Колубаев Е.А.** Особенности получения и организации структуры крупногабаритных функционально-градиентных биметаллических элементов на основе нержавеющей стали и меди методом электронно-лучевой проволочной аддитивной технологии.47
- Черемнов А.М., Гурьянов Д.А., Чумаевский А.В., Кобзев А.Е., Рубцов В.Е.** Закономерности образования дефектов и неоднородностей структуры при фрикционной перемешивающей обработке изделий из титанового сплава, полученных методом электронно-лучевой проволочной аддитивной технологии.58
- Абатурова А.А., Загуляев Д.В., Серебрякова А.А.** Динамика деформационного поведения сплава АК10М2Н при электронно-пучковой обработке.69

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- Кузнецова О.В., Темлянцев М.В., Темлянцева Е.Н., Запольская Е.М.** Исследование влияния темпа выдачи слэбов и заготовок на неравномерность теплового состояния и угар металла при нагреве в методических печах81
- Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Курочкин Н.М.** Энергоэффективная одновалковка дробилка, предназначенная для подготовки сырья к металлургическому переделу.86
- Улаханов Н.С., Мишигдоржийн У.Л., Семенов А.П., Милонов А.С., Воробьев М.С.,**

CONTENTS

CONDENSED MATTER PHYSICS

- Serebryakova A.A., Shlyarov V.V., Zagulyaev D.V.** Behavior of metals and alloys under the influence of a magnetic field.....9
- Sarychev V.D., Nevskii S.A., Granovskii A.Yu., Bashchenko L.P., Shamsutdinova D.V.** Model of convective heat transfer in high-entropy alloys during electron beam processing.....19
- Chapaikin A.S., Gromov V.E., Zhang P., Ivanov Yu.F., Kryukov R.E., Shlyarov V.V., Semin A.P.** Structural-phase states and properties of plasma surfacing with high-speed steel in a nitrogen environment35
- Chumaevskii A.V., Osipovich K.S., Semenchuk V.M., Tarasov S.Y., Kolubaev E.A.** Peculiarities of obtaining and organising the structure of large-size functional-gradient bimetallic elements based on stainless steel and copper by wire-feed electron beam additive manufacturing47
- Cheremnov A.M., Gurianov D.A., Chumaevskii A.V., Kobzev A.E., Rubtsov V.E.** Regularities of defects and structural inhomogeneities formation during friction stir processing of titanium alloy products obtained by wire-feed electron beam additive manufacturing58
- Abaturova A.A., Zagulyaev D.V., Serebryakova A.A.** Dynamics of the deformation behavior of the AK10M2N alloy during electron beam processing.....69

METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE

- Kuznetsova O.V., Temlyantsev M.V., Temlyantseva E.N., Zapol'skaya E.M.** Investigation of the effect of the rate of issuance of slabs and blanks on the unevenness of the thermal state and metal carbon monoxide during heating in methodical furnaces81
- Nikitin A.G., Epifantsev Yu.A., Kurochkin N.M.** Structural-phase states and properties of plasma surfacing with high-speed steel in a nitrogen medium86
- Ulakhanov N.S., Mishigdorzhiiin U.L., Semenov A.P., Milonov A.S., Vorob'ev M.S., Moskvin**

Москвин П.В., Шин В.И. Электронно-пучковая обработка диффузионных В-Аl-слоев на поверхности стали 5ХНМ ...92	P.V., Shin V.I. Electron beam processing of diffusion boroaluminizing layers on the surface of steel 5KHNМ92
Мурко В.И., Спиридонова И.В., Селиванов И.Д. Оптимизация закладочной смеси для Таштагольского рудника.....103	Murko V.I., Spiridonova I.V., Selivanov I.D. Optimization of the filling mixture for the Tashtagol mine103
Трибунский А.В. Исследование влияния кристаллографической текстуры на способность листов из алюминиевого сплава 3005 к гибочным операциям.....111	Tribunskiy A.V. Study of the influence of crystallographic texture on 3005 aluminum alloy sheets bending abilities111
Су Ч., Чэн С., Хао Х. Микроструктура и механические свойства проволоки дугового аддитивного производства сплава Al – 5Si....120	Su C., Chen X., Hao H. Microstructure and mechanical properties of wire arc additive manufacturing Al-5Si alloy120
Морозов И.С., Уманский А.А., Протопопов Е.В., Симачев А.С. Совершенствование технологии выплавки и внепечной обработки специализированных конвертерных сталей для производства мелющих шаров...127	Morozov I.S., Umanskii A.A., Protopopov E.V., Simachev A.S. Improving the technology of smelting and out-of-furnace processing of specialized converter steels for the production of grinding balls127
Абабков Н.В. Исследование структурно-фазового состояния и внутренних напряжений в зонах локализации деформации образцов из теплоустойчивой стали...135	Ababkov N.V. Study of the structural-phase state and internal stresses in zones of localized deformation of samples made of heat-resistant steel135
Кувшинникова Н.И., Пермяков А.А., Темлянтцев М.В. Физико-химические процессы в железорудном концентрате, предотвращаемые известью.....142	Kuvshinnikova N.I., Permyakov A.A., Temlyantsev M.V. Physico-chemical processes in iron ore concentrate, prevented by lime142

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ОТРАСЛЕВАЯ ЭКОНОМИКА

Набиева Н.М. Исследование условий внедрения инноваций в энергетическом секторе Узбекистана150
Астанова С.У., Хамзаева А.М. Проблемы занятости, безработицы и развития рынка труда в Кыргызской Республике.....163
Тишевский А.А., Черникова О.П. Экономическое обоснование строительства ремонтного цеха на автотранспортном предприятии ...171
К сведению авторов178

REGIONAL AND SECTORAL ECONOMY

Nabieva N.M. Study of conditions for the introduction of innovations in the energy sector of Uzbekistan150
Astanova S.U., Khamzaeva A.M. Problems of employment, unemployment and labor market development of the Kyrgyz Republic163
Tishevskii A.A. Economic justification for construction of a maintenance department at an automobile operating company ...171
For the information of the authors180

Оригинальная статья

УДК 669.713.017:538.9

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-9-18

ПОВЕДЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2024 г. А. А. Серебрякова, В. В. Шляров, Д. В. Загуляев

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

Аннотация. Представлен краткий обзор последних экспериментальных результатов изучения металлов и сплавов в условиях воздействия внешнего магнитного поля. Явление магнетизма очень широко исследуется различными группами ученых для применения в приборах и устройствах, используемых как в повседневной жизни людей, так и в промышленных масштабах. Выявлено, что влияние магнитного поля на структурно-фазовые превращения, прочностные и пластические свойства материалов при деформации в основном зависит от магнитной природы металла. Постоянное магнитное поле способствует изменению различных деформационных характеристик ряда твердых тел с ионной, ионно-ковалентной, ковалентной, молекулярной и металлической связями твердых тел. Установлено, что есть дополнительные факторы, обуславливающие изменение деформационных характеристик металлов и сплавов под воздействием внешних магнитных полей. В ходе анализа выявлены следующие факторы, дополнительно оказывающие влияние: температура плавления металла, строение кристаллической решетки, температура при проведении эксперимента, магнитная индукция при проведении обработки магнитным полем. Выявлено, что наибольшее количество исследований было проведено на титане, алюминии и их сплавах. Отмечено недостаточное количество исследований влияния магнитной обработки на технически чистый свинец. Результаты обзора могут иметь академическую значимость – полученные в исследовании результаты позволят расширить представления о влиянии магнитных воздействий на поликристаллические металлические материалы, а закономерности, полученные в работе, возможно использовать при изучении физических свойств металлических материалов.

Ключевые слова: магнитное поле, металл, сплав, свинец, диамагнетизм, парамагнетизм, деформация, дислокации, ползучесть, микротвердость

Для цитирования: Серебрякова А.А., Шляров В.В., Загуляев Д.В. Поведение металлов и сплавов под влиянием магнитного поля. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):9–18. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-9-18](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-9-18)

Original article

BEHAVIOR OF METALS AND ALLOYS UNDER THE INFLUENCE OF A MAGNETIC FIELD

© 2024 A. A. Serebryakova, V. V. Shlyarov, D. V. Zagulyaev

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

Abstract. A brief overview of the latest experimental results of studying metals and alloys under the influence of an external magnetic field is presented. The phenomenon of magnetism is widely studied by various groups of scientists for use in devices and devices used both in people's daily lives and on an industrial scale. It is revealed that the influence of the magnetic field on structural and phase transformations, strength and plastic properties of materials during deformation mainly depends on the magnetic nature of the metal. A constant magnetic field contributes to the change of various deformation characteristics of a number of solids with ionic, ion-covalent,

covalent, molecular and metallic bonding of solids. It has been established that there are additional factors that cause changes in the deformation characteristics of metals and alloys under the influence of external magnetic fields. During the analysis, the following factors were identified, additionally influencing: the melting point of the metal, the structure of the crystal lattice, the temperature during the experiment, magnetic induction during magnetic field treatment. It was revealed that the largest number of studies were conducted on titanium, aluminum and their alloys. An insufficient number of studies in the field of magnetic processing on technically pure lead have been noted. The results of the review may have academic significance – the results obtained in the study will expand the understanding of the influence of magnetic influences on polycrystalline metallic materials, and the patterns established in the work can be used in the study of the physical properties of metallic materials.

Key words: magnetic field, metals, alloys, lead, diamagnetism, paramagnetism, deformation, dislocations, creep, microhardness

For citation: Serebryakova A.A., Shlyarov V.V., Zagulyaev D.V. Behavior of metals and alloys under the influence of a magnetic field. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):9–18. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-9-18](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-9-18)

Введение

Особое внимание к изучению влияния магнитных полей на сплавы и металлы весьма актуально в последнее время [1]. В частности, это касается области изучения магнитной обработки. Магнитная обработка металлов и сплавов – воздействие в течение некоторого времени на материал или готовое изделие постоянного, переменного или импульсного магнитного поля без каких-либо иных внешних воздействий с целью управляемого изменения структуры и свойств обрабатываемого объекта [2]. Влияние магнетизма на металлы и сплавы активно изучается с помощью разнообразных экспериментов.

Если рассматривать зарубежный опыт исследования магнитного воздействия на металлы и сплавы, то можно выделить несколько стран (Россия, Китай, Япония, Корея, Индия), исследователи которых занимаются этим вопросом. Наибольшую заинтересованность к изучению магнитного воздействия на металлы и сплавы проявляют ученые из Китая.

Металлы и сплавы по своим магнитным свойствам делятся на несколько основных групп (парамагнетики, диамагнетики, ферромагнетики, антиферромагнетики). Изучение изменения механических свойств металлов и сплавов при воздействии на них внешними потоками энергии является активной областью для исследований в последние несколько лет. Это актуально для металлических материалов, которые нашли широкое применение во многих областях промышленности. Под влиянием постоянного магнитного поля могут изменяться деформационные характеристики ряда твердых тел с ионной, ионно-ковалентной, ковалентной, молекулярной и металлической связями твердых тел [3]. При обсуждении этих вопросов часто упоминается магнитопластический эффект (МПЭ), которому

стоит уделить особое внимание в процессах влияния магнитного поля на материалы и сплавы. Рассмотрено новое явление – движение дислокаций в постоянном магнитном поле в немагнитных кристаллах в отсутствие механической нагрузки (магнитопластический эффект). Определены следующие основные свойства МПЭ:

- инверсия знака индукции магнитного поля не меняет направления движения дислокаций;
- средний пробег дислокаций l линейно зависит от времени t пребывания образца в магнитном поле при небольших значениях магнитной индукции B (менее 1 Тл);
- средний пробег дислокаций l прямо пропорционален квадрату магнитной индукции при больших значениях t и относительно высокой величины B (более 1 Тл);
- эффект атермичен в интервале температур 4,2 – 77,0 К и лишь незначительно усиливается (на 20 – 30 %) при повышении температуры до комнатной.

Установлено, что магнитное поле создает условия открепления дислокаций от локальных дефектов, а их движение обусловлено действующими полями внутренних напряжений в кристалле. Эксперименты "in-situ" показали, что это движение имеет эстафетный характер.

Под действием магнитных полей изменяются пластичность, микротвердость, внутреннее трение, предел прочности и другие макроскопические свойства ионных кристаллов, полупроводников, металлов, а также молекулярных кристаллов, полимеров и т.д. [4; 5]. В работе [6] представлен анализ экспериментальных данных по влиянию магнитного поля на микротвердость алюминиевых, медных, титановых и магниевых сплавов. Происходит заметное изменение микротвердости сплавов по сравнению с образцами, неподвергнутых выдержке в слабом магнитном поле.

Подтверждено, что магнитное поле влияет на тип, структуру и свойства препятствий дислокаций в процессе пластической деформации. Исследования влияния магнитоупорядоченного эффекта на подвижность дислокаций [7] было проведено путем изменений индукции магнитного поля. Выявлено, что снижение интенсивности индукции магнитного поля увеличивает магнитоупорядоченный эффект. Кроме того, в работе [7] установлено, что воздействие магнитного поля влияет на макропластические свойства металлов.

В зависимости от классификации (по магнитной природе) эффект влияния магнитного поля на металл различен. Рассмотрим экспериментальные работы, в которых поднимаются вопросы влияния магнитных полей на металлы и сплавы различной магнитной природы, в частности, влияние магнитного поля на парамагнетики и диамагнетики.

Влияние магнитного поля на парамагнетики

Парамагнетики – вещества, которые намагничиваются в направлении внешнего магнитного поля и имеют положительную магнитную восприимчивость. Парамагнетики относятся к слабомагнитным веществам, магнитная проницаемость незначительно отличается от единицы.

Термин парамагнетизм ввел в 1848 г. М. Фарадей [8]. Молекулы парамагнетика обладают собственными магнитными моментами, которые под действием внешних полей создают результирующее поле, превышающее внешнее. Парамагнетики втягиваются в магнитное поле. При отсутствии внешнего магнитного поля парамагнетик не намагничен, так как из-за теплового движения собственные магнитные моменты атомов ориентированы совершенно беспорядочно [9]. К парамагнетикам относятся алюминий, вольфрам, цезий, платина, титан, литий, магний, натрий и многие другие (щелочные и щелочно-земельные металлы, а также сплавы этих металлов), кислород, оксиды азота и марганца, хлорное железо и другие [10; 11].

В работе [12] представлены результаты экспериментальных исследований динамической магнитной восприимчивости гексаферрита свинца в температурной области перехода из магнитоупорядоченного состояния в парамагнитное. При ориентации вектора напряженности переменного магнитного поля в направлении легкого намагничивания вдоль гексагональной оси в области температуры Кюри обнаружено аномальное пикообразное уменьшение действительной части магнитной восприимчивости. Наблюдаемый эффект зависит от частоты переменного магнитного поля и исчезает при частоте

примерно 12 МГц. Обнаруженные особенности интерпретируются как эффекты, обусловленные релаксационным резонансом.

В результате испытаний образцов титана марки ВТ1-0 на многоцикловую усталость выявлено, что наблюдается увеличение усталостной долговечности на 64 % в постоянном магнитном поле 0,3 Тл [13]. Экспериментальные результаты по исследованию процесса ползучести показали, что в постоянном магнитном поле скорость ползучести увеличивается на 30,71 %. В работах [14; 15] были получены результаты влияния магнитного поля на металлы и сплавы. Установлена зависимость изменения усталостной долговечности технически чистого титана от индукции магнитного поля. Показано, что включение постоянного магнитного поля в процессе испытаний приводит к многократному увеличению усталостной долговечности (199105 ± 15023 при $B = 0,3$ Тл; 270492 ± 20505 при $B = 0,4$ Тл и 319828 ± 27321 при $B = 0,3$ Тл). Методами сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии проведены исследования поверхности разрушения образцов титана марки ВТ1-0, разрушенных в условиях усталости в магнитном поле и без него. Разрушение материала проходит по смешанному механизму: присутствуют не только признаки хрупкого разрушения (фасетки квазискола), но и признаки пластической деформации (гребни). Установлено, что при усталостном нагружении в магнитном поле критическая длина трещины возрастает в 1,45 раза. В зоне усталостного роста трещины наблюдается формирование субзеренной структуры (размеры субзерен $0,56 \div 0,87$ мкм), а в магнитном поле при $B = 0,4$ Тл – $0,67 \div 1,1$ мкм. В зоне ускоренного роста трещины среднее расстояние между усталостными бороздками в образцах титана зависит от магнитной индукции и снижается от 0,78 мкм при $B = 0$ Тл до 0,49 при $B = 0,5$ Тл. Исследования дислокационной субструктуры образцов выявили формирование дислокационной субструктуры сетчатого типа (область поверхности разрушения до 5 мкм), переходящей в дислокационную субструктуру, сформированную хаотически распределенными дислокациями. Скалярная плотность дислокаций вблизи поверхности разрушения на расстоянии до 1 мкм составляет $6,9 \cdot 10^{10}$ см⁻²; $4,9 \cdot 10^{10}$ см⁻² и $4,55 \cdot 10^{10}$ см⁻² для образцов, разрушенных при величине B , равной 0,3 и 0,5 Тл. При увеличении расстояния от поверхности разрушения снижается, независимо от условий усталостных испытаний. Усталостные испытания образцов титана сопровождаются формированием внутренних полей напряжений, основными концентраторами напряжений являются границы раздела и

стыки границ зерен, границы раздела фрагментов, а также линии дислокаций. Поперечные размеры контуров экстинкции в поверхностном слое до 1 мкм, независимо от наличия магнитного поля, минимальны (15 – 17 нм). Включение магнитного поля приводит к плавному (от 17 до 99 нм при $B = 0,3$ Тл) и резкому (от 16 до 230 нм при $B = 0,5$ Тл) увеличению толщины контуров экстинкции. Плотность концентраторов напряжений в поверхностном поликристаллическом слое выше в образце, разрушенном в магнитном поле 0,3 Тл ($1,5 \text{ мкм}^{-2}$). Ранее было установлено, что воздействие магнитным полем на технически чистый титан марки ВТ1-0 приводит к снижению значения микротвердости на 3 – 8 % с последующей ее стабилизацией за время, зависящее от параметров обработки. Начальный эффект влияния (наблюдающийся сразу после экспозиции образцов из поля) характеризуется линейной зависимостью от времени обработки для индукции магнитного поля 0,3 и 0,4 Тл и носит ступенчатый характер для 0,5 Тл. Время стабилизации микротвердости линейно зависит от времени обработки для индукции магнитного поля 0,3 Тл, носит экспоненциальный характер для индукции 0,4 Тл и имеет сложный вид – для 0,5 Тл. Установлено, что стабилизация микротвердости за 24 ч происходит не для всех параметров воздействия, например, для параметров обработки 0,4 и 0,5 Тл; 1,75 и 2,00 ч выдержки – не происходит стабилизация за указанное время. Выявлен порог времени выдержки (0,5 ч), ниже которого не наблюдается эффект магнитного влияния независимо от индукции магнитного поля. В ходе экспериментальных исследований процесса ползучести установлено, что при воздействии магнитным полем 0,3 Тл происходит увеличение скорости ползучести титана до 3,39 %/ч. Дальнейшее увеличение индукции магнитного поля до 0,4 Тл приводит еще к более существенному увеличению скорости ползучести по сравнению с образцом, разрушенном без воздействия магнитным полем (скорость ползучести составляет 4,62 %/ч). Максимальный эффект увеличения скорости ползучести технически чистого титана марки ВТ1-0 наблюдается при наложении постоянного магнитного поля с индукцией 0,5 Тл, скорость процесса составляет 5,69 %/ч. Стоит отметить, что на начальной (логарифмической) стадии ползучести действие магнитного поля не выражено.

Влияние магнитного поля на диамагнетики

Диамагнетики – вещества, намагничивающиеся против направления внешнего магнитного поля. В присутствии внутреннего магнитного поля диамагнетики магнитны [9]. К диамагнети-

кам относятся инертные газы, азот, водород, кремний, фосфор, висмут, цинк, медь, золото, серебро, свинец, а также многие другие как органические, так и неорганические соединения. Человек в магнитном поле ведет себя как диамагнетик.

В работах [16 – 18] были проведены исследования оказываемого магнитным полем эффекта на бериллий и его сплавы. Изучено поведение образцов бериллия до, в течение и после обработки опытных образцов в слабом постоянном магнитном поле. По полученным экспериментальным данным рассчитаны температурно-временные зависимости отношения скоростей движения дислокаций в процессе и после магнитного воздействия. Выявлено, что экспозиция образцов в магнитном поле, а также их старение после магнитного воздействия кардинально меняет характер температурных зависимостей скоростей движения дислокаций. Итогом исследований стали эмпирические выражения, описывающие эти зависимости. Установлено, что последствия магнитного воздействия в диамагнитном бериллии имеет сложный характер, который подтверждает факт наличия нескольких механизмов «магнитной памяти».

В работе [19] исследована ползучесть цинка. Установлено, что скорость ползучести при сжатии монокристаллов цинка измерялась на приращениях деформации образца на 150 нм, что позволяло определять скачки деформации от 300 нм. Показано, что слабое постоянное магнитное поле с индукцией $B = 0,2$ Тл увеличивает среднюю скорость ползучести и уменьшает высоту и резкость субмикронных скачков деформации. Предварительная выдержка в поле влияет на скорость и характеристики скачков деформации. Это объясняется с позиций модели, связывающей действие магнитного поля с разрушением барьеров для движения дислокаций.

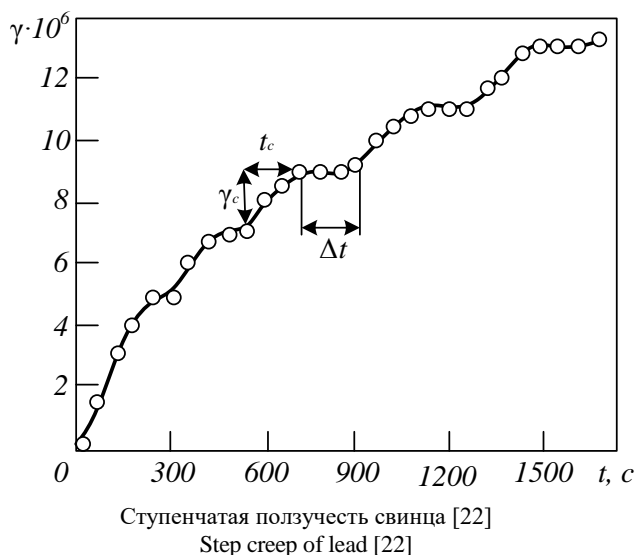
В работе [20] исследована динамика магнитной проницаемости диамагнитных диэлектриков. Магнитная проницаемость характеризует магнитные свойства материала. Она сильно зависит от поля для нелинейных сред (ферромагнетики, для которых характерен гистерезис). Для таких сред магнитная проницаемость как независимое от поля число может указываться приближенно в рамках линеаризации. Для парамагнетиков и диамагнетиков линейное приближение достаточно хорошо для широкого диапазона величин поля.

Одним из наименее исследованных диамагнетиков является свинец. Проведем исследование ползучести свинца без воздействия магнитного поля. В работе [21] получен ступенчатый вариант ползучести. Вопрос ступенчатой ползу-

чести был изучен ранее, но до настоящего времени нет единого мнения о природе данного явления, поэтому рассматриваемая тема является актуальной для изучения. Испытания проводили на проволочных образцах, предварительно подверженные отжигу. В ходе испытаний были получены кривые ползучести в координатах деформация – время (см. рисунок).

Образование ступенек объясняется тем, что в процессе деформации, вновь образовавшиеся дислокации встречаются на пути движения препятствия. Это затормаживает процесс деформации. Локальное поле напряжений заторможенных дислокаций будет возрастать с увеличением деформации пропорционально их количеству. Когда поле напряжений достигнет уровня, необходимого для преодоления поля напряжения препятствия, направленного против приложенного напряжения, происходит прорыв дислокаций. Это приводит к появлению ступеньки на кривой ползучести. Установлено, что ступенчатая ползучесть обусловлена периодическим размножением дислокаций вследствие диффузионных процессов, протекающих в ядре дислокации.

В работе [22] рассмотрено влияние периодических колебаний на немонотонную ползучесть свинца. Испытания проводили на проволочных образцах свинца, которые предварительно были подвержены отжигу. Исследования проводили при комнатной температуре на установке, позволяющей одновременно измерять ползучесть и внутреннее трение. Напряжение ползучести было ниже предела текучести (2,04 МПа). Внутреннее трение измеряли в амплитуднонезависимой области. Максимальный сдвиг на поверхности образца, возникающий под действием периодических колебаний, составлял $7 \cdot 10^{-6}$ отн. ед., что соответствует амплитуде напряжения 0,042 МПа. Частоту колебаний варьировали в пределах 0,79 – 4,60 кол/с. Кривые внутреннего трения



фиксируют на движущейся фотопленке осциллографа, измерения проводили в течение 1 ч.

Немонотонный характер изменения параметров ползучести в зависимости от частоты колебаний связан с релаксационным процессом внутри ядер дислокаций, происходящим под действием знакопеременных напряжений. Периодическое изменение внутреннего трения под влиянием приложенного напряжения в процессе немонотонной ползучести связано с размножением дислокаций, обусловленным перераспределением подвижных точек закрепления вдоль дислокации. Природа микропластических деформаций, обнаруживающихся в процессе немонотонной ползучести, возрастание внутреннего трения при действии на образец периодически изменяющегося и монотонно нарастающего в пределах макроупругости сдвигового напряжения, независимо от способа нагружения образца, обусловлена одним и тем же физическим процессом (размножением дислокаций).

В работах [23; 24] на основе представлений физической мезомеханики исследованы закономерности структурных изменений в поликристаллах свинца на разных стадиях ползучести. Показано, что стадии ползучести свинца формируются как эволюция структурных уровней деформации, масштаб которых возрастает в следующей последовательности: микро, мезо, макро. Стадия *I* неустановившейся ползучести связана с локальными кристаллографическими сдвигами на микромасштабном уровне. На стадии *II* стационарной ползучести ведущим механизмом деформации является движение зерен как целого на мезомасштабном уровне, аккомодируемое внутризеренными сдвигами и резко выраженными эффектами фрагментации и экструзии в приграничных зонах. Стадия *III* ускоренной ползучести связана с движением как целого конгломератов самосогласованно деформирующихся зерен на макромасштабном уровне. Количественные измерения показали, что сдвиговые и поворотные составляющие деформации при ползучести развиваются взаимосвязанно и самосогласованно.

В работе [25] исследованы характер и механизм формирования динамической мезоструктуры, статистика числа и распределения трещин по размерам, их связь с характеристиками усталости свинца и свинцовых сплавов при знакопеременном изгибе. Показано, что определяющую роль в их усталостном разрушении играют масштаб, форма элементов динамической мезоструктуры и кинетика ее формирования, в основе которой лежит степень однородности деформации. Решающим фактором в повышении долговечности поликристаллов является подавление локализации деформации и, как следствие,

формирования мезоконцентраторов напряжений. Это предотвращает развитие опасной блочной мезоструктуры и рост усталостных трещин выше критического размера.

В работе [26] проведены исследования физико-химических процессов, инициированных переменным магнитным полем напряженностью 0,1 Тл и частотой до 10 кГц в немагнитных кристаллах азидов серебра и свинца. Экспериментально обнаружено медленное разложение, сопровождающееся пластической деформацией как при действии переменного магнитного поля, так и в пост-процессах. Исследована зависимость относительного объема выделившегося газа при протекании пост-процессов от частоты переменного магнитного поля.

Было исследовано внешнее критическое магнитное поле магнитных сверхпроводников, зависящее от температуры (применяемое для сверхпроводников свинца и висмута (Pb82Bi18)) [27]. Было исследовано внешнее критическое магнитное поле магнитных сверхпроводников по теории Гинзбурга-Ландау. Анализ и модификацию зависимости свойств от температуры исследовали методом вариации, с помощью первого уравнения Гинзбурга-Ландау. Аналитическая формула внешнего критического магнитного поля определялась магнитными свойствами материала (восприимчивости и дифференциальной восприимчивости). Кроме того, зависящее от температуры внешнее критическое магнитное поле было изучено на основе четырех моделей: Чена, Чжу, Шаненко и Чанжана.

В работах [28; 29] были проведены исследования и получены экспериментальные зависимости по влиянию магнитного поля на микротвердость, скорость ползучести, время длительности процесса ползучести, относительное остаточное удлинение образца и фрактографические особенности поверхности разрушения свинца марки С2. Установлено, что при величине $B = 0,3$ Тл скорость ползучести увеличилась на 87 %, а при значении B 0,4 и 0,5 Тл скорость ползучести снижается по сравнению с исходными значениями на 94 и 97 %.

Выводы

На основании обзора современных исследований по влиянию магнитного поля на материалы и сплавы выявлено, что определяющим фактором в изменении свойств металлов и сплавов, подвергнутых магнитной обработке, является магнитная природа материала. Выявлены факторы, оказывающие влияние во время магнитной обработки (температура плавления металла, строение кристаллической решетки, температура при проведении эксперимента, магнитная ин-

дукция при проведении обработки магнитным полем). Установлено, что влияние магнитной обработки на парамагнетики проявляется снижением микротвердости и увеличением скорости ползучести. Кроме того, включение магнитного поля приводит к плавному увеличению толщины контуров экстинкции и многократному увеличению усталостной долговечности. Влияние магнитного поля на диамагнитные материалы выражается увеличением средней скорости ползучести, а также снижением высоты и резкости субмикронных скачков деформации. Анализ последних публикаций свидетельствует о том, что на диамагнитном свинце проведено недостаточное количество исследований поведения рассматриваемого металла под влиянием магнитного поля, что обуславливает актуальность изучения этого диамагнетика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моргунов Р.Б., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В. Термодинамический анализ магнитоэластических эффектов в «немагнитных» металлах. *Труды ВИАМ*. 2018;12:79–87. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-12-79-87>; EDN: YROENN.
2. Моргунов Р.Б., Валеев Р.А., Скворцов А.А., Королев Д.В., Пискорский В.П., Куницына Е.И., Кучеряев В.В., Коплак О.В. Магнитоэластический и магнитомеханический эффекты в алюминиевых сплавах с магнитоэластическими микровключениями. *Труды ВИАМ*. 2019;10:3–13. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-10-3-13>; EDN: BRGQUK.
3. Alshits V.I., Darinskaya E.V., Koldaeva M.V., Petrzhek E.A. *Crystallography Reports*. 2003;48:768–795
4. Покоев А., Осинская Ю., Шахбанова С., Ямщикова К. Магнитоэластический эффект в алюминиевых сплавах. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2018;82: 961–964. <https://doi.org/10.1134/S0367676518070335> EDN: XWOIWD.
5. Pokoev A., Osinskaya J. Manifestation of Magnetoplastic Effect in Some Metallic Alloys. *Defect and Diffusion Forum*. 2018;383:180–184. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.383.180>
6. Li G.-R., Wang H., Li P.-S., Gao L.-Z., Peng C.-X., Zheng R. Mechanism of dislocation kinetics under magnetoplastic effect. *Acta Physica Sinica*. 2015;64(14):148102. <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.148102>

7. Краев М.В., Краева В.С. Пластическая деформация металлов и сплавов с применением постоянного магнитного поля. В кн.: *Материалы 6-й международной конференции «Космические технологии: настоящее и будущее»*. Днепр. 2017:75.
8. Плетнев С.В. *Магнитное поле, свойства, применение: Научное и учебно-методическое справочное пособие*. Санкт-Петербург: Гуманистика, 2004:624.
9. Ida N. The Static Magnetic Field. In: *Engineering Electromagnetics*. Springer. 2021;377–418. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-15557-5_8
10. Kassner M.E. *Fundamentals of Creep in Metals and Alloys*. Elsevier Ltd. 2015:356. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-047561-5.X0001-2>
11. Попова Л.И., Болдырев Д.А. *Физика прочности и пластичности*. Тольятти: ТГУ. 2017:74.
12. Безлепкин А.А., Кунцевич С.П., Костюков В.И. Ориентационные и релаксационные особенности динамической магнитной восприимчивости $PbFe_{12}O_{19}$ при переходе из магнитоупорядоченного состояния в парамагнитное. *Физика твердого тела*. 2015;11:2151–2154. EDN: UJMJMR.
13. Аксенова К.В., Шляров В.В., Загуляев Д.В. Деформационное поведение технически чистого титана в постоянном магнитном поле 0,3 Тл. В кн.: *Актуальные проблемы физического металловедения сталей и сплавов. Сборник тезисов докладов XXVI Уральской школы металловедов-термистов, Екатеринбург, 07–11 февраля 2022 года*. Екатеринбург: УРФУ. 2022;123–127. EDN: LTYFYK.
14. Шляров В.В., Загуляев Д.В., Громов В.Е., Глезер А.М., Серебрякова А.А. Особенности деформации технически чистого титана в постоянном магнитном поле. *Деформация и разрушение материалов*. 2022;3:25–31. EDN: NZOQKK.
15. Шляров В.В., Загуляев Д.В., Шлярова Ю.А., Серебрякова А.А., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е. Изменение элементного и фазового состава, дефектной субструктуры образцов системы «пленка (ТИТАН) / (АК5М2) подложка», подвергнутых облучению электронным пучком. В кн.: *Материалы во внешних полях: труды XII Международного онлайн-симпозиума*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ. 2023:67–69. EDN: ADYYSB.
16. Курек Е.И., Курек И.Г., Олейнич-Лысюк А.В., Раранский Н.Д. Об особенностях магнитного последствия в высокочистом диамагнитном бериллии. *Физика твердого тела*. 2014;56(8):1546–1553. EDN: SNVZDJ.
17. Осинская Ю.В., Петров С.С., Покоев А.В., Рунов В.В. Исследование методом малоуглового рассеяния нейтронов магнитоэластического эффекта в бериллиевой бронзе при старении в магнитных полях. *Физика твердого тела*. 2010;52(3):486–488. EDN: RCRTQN.
18. Осинская Ю.В., Петров С.С., Покоев А.В. Комплексное экспериментальное исследование магнитоэластического эффекта в медно-бериллиевом сплаве. *Вестник СамГУ*. 2010;4(78):145–154. EDN: NNLLHT.
19. Песчанская Н.Н., Смирнов Б.И., Шпейзман В.В. Скачкообразная ползучесть при сжатии монокристаллов цинка в магнитном поле. *Физика твердого тела*. 2008;50(6):997–1001. EDN: RCRIWD.
20. Калытка В.А., Баширов А.В., Оспанов Б.С., Балтабаева Н.Т. Магнитная проницаемость диамагнитных и ферромагнитных диэлектриков. *Актуальные научные исследования в современном мире*. 2019;5–1(49):145–148. EDN: OMORLL.
21. Могильникова Т.Т. Ступенчатая ползучесть свинца. *Вопросы атомной науки и техники*. 2010;6:42–46.
22. Могильникова Т.Т. Влияние периодических колебаний на немонотонную ползучесть свинца. *Вестник ХНУ*. 2010;14:65–69.
23. Елсукова Т.Ф., Новоселова Е.М., Караваева В.В., Ангелова Г.В. Стадии высокотемпературной ползучести поликристаллов свинца как эволюция структурных уровней пластической деформации. *Физическая мезомеханика*. 2000;3(5):91–99.
24. Жукова К.П., Елсукова Т.Ф., Панин В.Е., Руденко Ю.Н. Температурная зависимость процессов деформации на границах зерен и в приграничных зонах при растяжении поликристаллов свинца. *Известия вузов. Физика*. 1988;4:13–18.
25. Елсукова Т.Ф., Панин В.Е. Закономерности и механизм циклической деформации, статистика развития усталостных трещин в свинце и сплавах на его основе. *Физика металлов и металловедение*. 2004;97(1):121–128.
26. Крашенинин В.И., Кузьмина Л.В., Дорохов М.А. Реакционная способность и дислокационная структура кристаллов азидов серебра и свинца в переменном магнитном поле. *Изве-*

- стия вузов. *Физика*. 2006;49(1):103–106. EDN: KYCQMF.
27. Changjan A., Meakniti S., Udomsamuthirun P. The temperature-dependent surface critical magnetic field (HC3) of magnetic superconductors: Applied to lead bismuth (Pb82Bi18) superconductors. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2017;107:32–35. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2431/1/012044>
 28. Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шляров В.В. Влияние магнитного поля с индукцией до 0,5 Тл на динамику деформационных характеристик свинца. *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2023;20(1):52–58. <http://dx.doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.006>; EDN:EURCJU.
 29. Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шляров В.В., Громов В.Е., Аксенова К.В. Исследование микротвердости и параметра пластичности свинца во внешних магнитных полях с индукцией до 0.5 Тл. *Известия Алтайского государственного университета*. 2023;4(132):52–58. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2023\)4-07](https://doi.org/10.14258/izvasu(2023)4-07)
- ### REFERENCES
1. Morgunov R.B., Piskorskii V.P., Valeev R.A., Korolev D.V. Thermodynamic analysis of magnetoplastic effects in "non-magnetic" metals. *Trudy VIAM*. 2018;12:79–87. (In Russ.). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-12-79-87> EDN: YROENN.
 2. Morgunov R.B., Valeev R.A., Skvortsov A.A., Korolev D.V., Piskorskii V.P., Kunitsyna E.I., Kucheryaev V.V., Koplak O.V. Magnetoplastic and magnetomechanical effects in aluminum alloys with magnetostrictive microswitches. *Trudy VIAM*. 2019;10:3–13. (In Russ.). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-10-3-13>; EDN: BRGQUK.
 3. Alshits V.I., Darinskaya E.V., Koldaeva M.V., Petrzhik E.A. *Crystallography Reports*. 2003;48:768–795.
 4. Pokoev A., Osinskaya Yu., Shakhbanova S., Yamshchikova K. Magnetoplastic effect in aluminum alloys. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya*. 2018;82:961–964. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0367676518070335> EDN: XWOIWD.
 5. Pokoev A., Osinskaya J. Manifestation of Magnetoplastic Effect in Some Metallic Alloys. *Defect and Diffusion Forum*. 2018;383:180–184. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.383.180>
 6. Li G.-R., Wang H., Li P.-S., Gao L.-Z., Peng C.-X., Zheng, R. Mechanism of dislocation kinetics under magnetoplastic effect. *Acta Physica Sinica*. 2015;64(14):148102. <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.148102>
 7. Kraev M.V., Kraeva V.S. Plastic deformation of metals and alloys using a constant magnetic field. In: «*Materials of the 6th International Conference "Space Technologies: Present and Future"*». Dnepropetrovsk 2017:75. (In Russ.).
 8. Pletnev S.V. Magnetic field, properties, application: Scientific and methodological reference manual. Sankt-Peterburg: Gumanistika, 2004: 624. (In Russ.).
 9. Ida N. The Static Magnetic Field. In: *Engineering Electromagnetics*. 2021;377–418. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-15557-5_8
 10. Kassner M.E. *Fundamentals of Creep in Metals and Alloys*. Elsevier Ltd, 2015:356. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-047561-5.X0001-2>
 11. Popova L.I., Boldyrev D.A. *Physics of strength and plasticity*. Togliatti: Izd-vo TGU, 2017:74. (In Russ.).
 12. Bezlepkina A.A., Kuntsevich S.P., Kostyukov V.I. Orientation and relaxation features of dynamic magnetic susceptibility $PBFe_{12}O_{19}$ during the transition from a magnetically ordered state to a paramagnetic state. *Fizika tverdogo tela*. 2015;11:2151–2154. (In Russ.). EDN: UJMJMR.
 13. Aksенова К.В., Шлыаров В.В., Загуляев Д.В. Deformation behavior of technically pure titanium in a constant magnetic field of 0.3 T. In book: Actual problems of physical metallurgy of steels and alloys: a collection of theses of reports of the XXVI Ural School of Thermists, Yekaterinburg, February 07-11, 2022. Yekaterinburg: *Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta*, 2022;123–127. (In Russ.). EDN: LTYFYK.
 14. Shlyarov V.V., Zagulyaev D.V., Gromov V.E., Glezer A.M., Serebryakova A.A. Features of deformation of technically pure titanium in a constant magnetic-nitric field. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2022;3:25–31. (In Russ.). EDN: NZOQKK.
 15. Shlyarov V.V., Zagulyaev D.V., Shlyarova Yu.A., Serebryakova A.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. Change in the elemental and phase composition, defective substructure of samples of the "film (TITAN)/(AK5M2) substrate" system exposed to electron beam irradiation. In: *Materials in the external fields: works of the XII In-*

- ternational Online Symposium*. Novokuznetsk: ITs SibGIU. 2023:67–69. (In Russ.).
16. Kurek E.I., Kurek I.G., Oleinich-Lysyuk A.V., Raranskii N.D. On the features of magnetic aftereffect in highly pure diamagnetic beryllium. *Fizika tverdogo tela*. 2014;56(8):1546–1553. (In Russ.). EDN: ADYYSB.
 17. Osinskaya Yu.V., Petrov S.S., Pokoev A.V., Runov V.V. Investigation by small-angle neutron scattering of magnetoplastic effect in beryllium bronze during aging in magnetic fields. *Fizika tverdogo tela*. 2010;52(3):486–488 (In Russ.). EDN: SNVZDJ.
 18. Osinskaya Yu.V., Petrov S.S., Pokoev A.V. Comprehensive experimental study of magnetoplastic effect in copper-beryllium alloy. *Vestnik SamGU*. 2010;4(78):145–154. (In Russ.).
 19. Peschanskaya N.N., Smirnov B.I., Shpeizman V.V. Jump creep when compressing zinc single crystals in a magnetic field. *Fizika tverdogo tela*. 2008;50(6):997–1001. (In Russ.). EDN: RCRTQN.
 20. Kalytka V.A., Bashirov A.V., Ospanov B.S., Baltabaeva N.T. Magnetic permeability of diamagnetic and ferromagnetic dielectrics. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremenom mire*. 2019;5-1(49):145–148. (In Russ.). EDN: NNLLHT.
 21. Mogil'nikova T.T. Stupenchataya polzuchest' svintsya. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki*. 2010;6:42–46. (In Russ.). EDN: RCRIWD.
 22. Mogil'nikova T.T. Effect of periodic fluctuations on lead non-monotonic creep. *Visnik KhNU*. 2010;14:65–69. (In Russ.). EDN: OMORLL.
 23. Elsukova T.F., Novoselova E.M., Karavaeva V.V., Angelova G.V. High temperature creep stages of lead polycrystals as evolution of structural levels of plastic deformation. *Fizicheskaya mezhmekhanika*. 2000;3(5):91–99. (In Russ.).
 24. Zhukova K.P., Elsukova T.F., Panin V.E., Rudenko Yu.N. Temperature dependence of deformation processes at grain boundaries and in boundary zones when stretching lead polycrystals. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 1988;4:13–18. (In Russ.).
 25. Elsukova T.F., Panin V.E. Regularities and mechanism of cyclic deformation, statistics on the development of fatigue cracks in lead and alloys based on it. *Fizika metallov i metallovedenie*. 2004;97(1):121–128. (In Russ.).
 26. Krashenin V.I., Kuz'mina L.V., Dorokhov M.A. Reactivity and dislocation structure of silver and lead azide crystals in an alternating magnetic field. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2006;49(1):103–106. (In Russ.).
 27. Changjan A., Meakniti S., Udomsamuthirun P. The temperature-dependent surface critical magnetic field (HC3) of magnetic superconductors: Applied to lead bismuth (Pb82Bi18) superconductors. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2017;107:32–35. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2431/1/012044>
 28. Serebryakova A.A., Zagulyaev D.V., Shlyarov V.V. Influence of magnetic field with induction up to 0.5 T on dynamics of deformation characteristics of lead. *Fundamental'nye problemy sovremenno materialovedeniya*. (In Russ.). 2023;20(1):52–58. <http://dx.doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.006>; EDN: KYCQMF.
 29. Serebryakova A. A., Zagulyaev D. V., Shlyarov V. V., Gromov V. E., Aksenova K. V. Study of microhardness and plasticity parameter of lead in external magnetic fields with induction up to 0.5 T. *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2023;4(132):52–58. (In Russ.). [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2023\)4-07](https://doi.org/10.14258/izvasu(2023)4-07)
- Сведения об авторах**
Анна Александровна Серебрякова, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: aserebrakova87@gmail.com
SPIN-код: 5889-2235
AuthorID: 1105025
- Виталий Владиславович Шляров**, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: shlyarov@mail.ru
ORCID: 0000-0001-8130-648X
SPIN-код: 5074-3309
- Дмитрий Валерьевич Загуляев**, д.т.н., профессор кафедры естественно-научных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-9859-8949
SPIN-код: 9522-4745
- Information about the authors**
Anna A. Serebryakova, Postgraduate student of the Department of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
E-mail: aserebrakova87@gmail.com
SPIN-code: 9522-4745
- Vitaly V. Shlyarov**, Post-graduate student of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University
E-mail: shlyarov@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8130-648X

SPIN-code: 5074-3309

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Dmitry V. Zaguliaev, *Dr. Sci. (Tech.), Prof. of the Chair of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University*

E-mail: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-9859-8949

SPIN-code: 9522-4745

Поступила в редакцию 29.03.2023

После доработки 24.04.2023

Принята к публикации 27.04.2023

Received 29.03.2023

Revised 24.04.2023

Accepted 27.04.2023

Оригинальная статья

УДК 532.5:669.017

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-19-34

МОДЕЛЬ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВАХ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ

© 2024 г. В. Д. Сарычев, С. А. Невский, А. Ю. Грановский, Л. П. Башенко,
Д. В. Шамсутдинова

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

Аннотация. Предложена модель конвективного перемешивания при обработке низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками высокоэнтропийных расплавов систем AlCoCrFeNi и CuBiSnInPb с учетом испарения с поверхности материалов. В основу модели положены представления, что обработка концентрированными потоками энергии приводит к возникновению в расплавленном слое вихревых паттернов. Механизм их образования заключается в том, что наличие градиента температур в расплавленном слое приводит к возникновению термокапиллярной конвекции. Основными уравнениями модели конвективного течения являются уравнения Навье-Стокса, теплопереноса в жидких средах и граничные условия с учетом оттока испарившегося материала. Решение этих уравнений методом конечных элементов проводилось для двух случаев. В первом случае не учитывалась зависимость теплофизических параметров от температуры, а во втором данная зависимость была учтена. В первом случае на стадии нагрева течение расплава AlCoCrFeNi носит ламинарный характер. Неустойчивость течения наблюдается на границе расплав/твердое тело. Стадия остывания характеризуется образованием вихревых течений. Формирование вихрей происходит как на расстояниях, близких к радиусу пятна облучения, так и в центральной области. В случае сплава CuBiSnInPb наблюдается такая же картина с той лишь разницей, что процессы конвективного течения протекают быстрее из-за меньших значений поверхностного натяжения и температуры ликвидуса. Во втором случае электронно-пучковая обработка приводит к формированию многовихревого паттерна, который, развиваясь на стадии нагрева, захватывает все новые области материала. На стадии остывания наблюдается слияние вихрей и формирование стационарного ламинарного течения.

Ключевые слова: термокапиллярная неустойчивость, конвективные течения, высокоэнтропийные сплавы, вихревой паттерн, испарение, метод конечных элементов

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта ФГБОУ ВО «СибГИУ» договор № 128/2023 от 02.06.2023 и гранта Российского научного фонда (проект № 22-79-10229 (исследование комбинированной термокапиллярной неустойчивости и неустойчивости Кельвина-Гельмгольца)).

Для цитирования: Сарычев В.Д., Невский С.А., Грановский А.Ю., Башенко Л.П., Шамсутдинова Д.В. Модель конвективного теплопереноса в высокоэнтропийных сплавах при электронно-пучковой обработке. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):19–34. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-19-34](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-19-34)

Original article

MODEL OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN HIGH-ENTROPY ALLOYS DURING ELECTRON BEAM PROCESSING

© 2024 V. D. Sarychev, S. A. Nevskii, A. Y. Granovskii, L. P. Bashchenko, D. V. Shamsutdinova

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

Abstract. A model of convective mixing is proposed for processing high-entropy melts of AlCoCrFeNi and CuBiSnInPb systems with low-energy high-current electron beams, taking into account evaporation from the surface of materials. The model is based on the idea that processing with concentrated energy flows leads to the appearance of vortex patterns in the molten layer. The mechanism of their formation lies in the fact that the presence of a temperature gradient in the melted layer leads to the occurrence of thermocapillary convection. The convective flow model is based on the Navier-Stokes equations, heat transfer in liquid media and boundary conditions taking into account the outflow of evaporated material. The solution of these equations by the finite element method was carried out for two cases. In the first case, the dependence of thermophysical parameters on temperature was not taken into account, and in the second, this dependence was taken into account. It showed that in the first case in the AlCoCrFeNi melt at the heating stage, the melt flow is laminar. The instability of this flow is observed at the "melt/solid" boundary. The cooling stage is characterized by the formation of vortex flows. The formation of vortices occurs both at a distance close to the radius of the irradiation spot and in the central region. In the case of the CuBiSnInPb alloy, the same pattern is observed, with the only difference that the convective flow processes proceed faster due to lower values of surface tension and liquidus temperature compared to the previous case. In the second case, electron beam processing leads to the formation of a multi-vortex pattern, which, developing at the heating stage, captures all new areas of the material. At the cooling stage, the fusion of vortices and the formation of a stationary laminar flow is observed.

Keywords: thermocapillary instability, convective flows, high-entropy alloys, vortex pattern, evaporation, finite element method

Funding: The study was carried out at the expense of the grant of the SibSIU contract No. 128/2023 dated 06/02/2023 and the grant from the Russian Science Foundation (Project No. 22-79-10229 (study of combined thermocapillary instability and Kelvin-Helmholtz instability)).

For citation: Sarychev V.D., Nevskii S.A., Granovskii A.Yu., Bashchenko L.P., Shamsutdinova D.V. Model of convective heat transfer in high-entropy alloys during electron beam processing. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):19–34. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-19-34](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-19-34)

Введение

В последнее время интенсивно изучается воздействие концентрированных потоков энергии, в частности, низкоэнергетических высокоэнергетических электронных пучков на структуру, фазовый состав и механические свойства металлических материалов различного химического состава [1 – 3]. Преимущества этого вида обработки заключаются в том, что ее импульсно-периодический характер позволяет, с одной стороны, увеличить время нахождения поверхностных слоев в расплавленном состоянии, а с другой – обеспечить закалочные эффекты, приводящие к формированию субмикро- и наноразмерной структуры [4]. С другой стороны, недостатком электронно-пучковой обработки (ЭПО) является формирование на поверхности материалов кратеров [5], которые являются опасными концентраторами напряжений при знакопеременном циклическом нагружении. Именно поэтому необходим выбор таких режимов обработки, при которых влияние кратеров было бы минимально, а толщина модифицированного слоя превышала бы размер повреждаемого при эксплуатации слоя. Для поиска таких режимов нужна информация о механизмах воздействия ЭПО на структуру и свойства материалов. Особенно это

касается нового класса материалов – высокоэнтропийных сплавов (ВЭС). Как показано в работах [6, 7], многократное облучение сплавов CrFeCoNiMo [6] и CoCrFeNiMo_{0,2} [7] электронным пучком с плотностью энергии 4 Дж/см² и длительностью импульса 1,5 мкс приводит к формированию зоны оплавления, толщина которой растет с увеличением количества импульсов. Электронно-микроскопические исследования показали, что зона оплавления имеет кристаллическую структуру со средним размером кристаллитов 109 нм [7]. Такая структура способствует повышению микротвердости материала с 300 HV до 392,3 HV, что на 30,5 % больше, чем у необработанного образца. Механизм повышения твердости и износостойкости сплава CoCrCuFeNiV_x, полученного спеканием и электронно-пучковым переплавлением, изучен в работе [8]. В этой работе показано, что ванадий снижает энтальпию сплава CoCrCuFeNiV_x и способствует стабилизации фазы твердого ГЦК раствора. Твердость сплава CoCrCuFeNiV может достигать 408,4 HV, что на 35,4 % выше, чем у сплава CoCrCuFeNi (301,5 HV). Износостойкость сплава CoCrCuFeNiV значительно повышается за счет образования упрочняющего слоя и оксидной пленки на поверхности, а скорость

износа снижается на 80,6 %. В работах [9 – 11] показано, что ВЭС, полученные селективным электронно-пучковым плавлением, обладают высокими механическими свойствами, что обусловлено формированием структур и фаз микро- и наноразмерного диапазонов. В работе [9] установлено, что полученный сплав $Al_{0,5}CrMoNbTa_{0,5}$ состоит из двух зон с двумя многокомпонентными твердыми растворами, которые отличаются только содержанием алюминия. В работе [10] исследованы механические и электрохимические свойства эквимольного ВЭС ($AlCoCrFeNi$), полученного методом селективной электронно-лучевой плавки. При таком методе получения по сравнению с традиционными литейными технологиями механические и электрохимические свойства улучшены. В работе [11] показано, что селективная электронно-лучевая плавка (СЭЛП) способствует формированию двухфазной структуры сплава $AlCoCrFeNi$, состоящей из объемноцентрированной кубической (ОЦК) матрицы твердого раствора с равномерно распределенными границиентрированными кубическими (ГЦК) структурированными осадками. Обработка, включающая предварительный нагрев, может обеспечить образование богатых медью ГЦК-фаз с игольчатой и сферической морфологией, а также нанотрубок, которые осаждаются *in situ* из метастабильной ОЦК-матрицы (В2). Прочность на сжатие и пластичность этого сплава превосходят показатели ВЭС, обработанных методом селективного лазерного плавления. Кроме того, использование последующего селективного электронно-лучевого переплава может привести к более высокой относительной плотности, более тонкой микроструктуре и улучшенным свойствам при сжатии [11]. В частности, образцы SEB-RM продемонстрировали лучшую прочность на сжатие (2572 МПа), предел текучести (870 МПа) и деформацию (18,3 %). Улучшенные механические свойства образцов SEB-RM можно объяснить измельчением зерен и осаждением ГЦК-фазы, главным образом вдоль границ зерен. Это позволяет по-новому взглянуть на двухфазные ВЭС, изготовленные с помощью комбинации процессов аддитивного производства и селективного электронно-лучевого переплава.

Результаты работы [12] показывают, что по структуре и фазовому составу сплав $AlCrTiNbMo$, наплавленный электронным пучком на подложку из $Ti600$, представлен двумя фазами твердого раствора ОЦК А2 и В2, а также фазами Лавеса Ti_3Al и интерметаллическим соединением Mo_3Al_8 . Результаты испытаний на твердость и износостойкость показали, что микротвердость покрытия составляет 813,5 HV, в то

время как микротвердость подложки – 370,7 HV. Потеря массы покрытия после испытания на износ составляет всего 1,02 мг, в то время как потеря массы $Ti600$ – 38,81 мг. На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что покрытие $AlCrTiNbMo$ обладает превосходной износостойкостью и широкими перспективами применения. В работе [13] покрытия сплава $NiCoCrAlYSiHf$, нанесенные методом дугового ионного напыления, были модифицированы путем облучения сильноточным импульсным электронным пучком (СИЭП) в различных режимах. Грубая поверхность исходного покрытия была полностью модифицирована. Были получены модифицирующие эффекты облучения СИЭП, включая чистовую обработку поверхности, оптимизацию состава и корректировку микроструктуры. Проведено сравнительное исследование переходных процессов окисления исходного и облученного покрытий при температуре 1100 °С в течение 10 ч. Результаты эксперимента показали, что эффекты переплава, вызванные облучением СИЭП, могут значительно влиять на поведение термически выращенных оксидов, проявляясь в быстром образовании слоя $\alpha-Al_2O_3$ на переходной стадии окисления, который гарантирует защитный эффект данных покрытий на последующих стадиях этого процесса. Таким образом, электронный пучок способствует существенным преобразованиям структуры и изменению механических и трибологических свойств ВЭС.

Один из возможных механизмов – образование конвективных течений в ванне расплава, полученных при воздействии электронного пучка. Причиной их возникновения является действие термокапиллярных сил [14 – 16]. Явление термокапиллярной конвекции исследовалось во многих работах. В работе [14] установлено, что при достижении числом Марангони достаточно больших значений формируется двухвихревое течение. В работе [15] предложена математическая модель теплопереноса в облучаемой интенсивным пучком заряженных частиц мишеней, включающая в себя уравнения механики сплошных сред и кинетическое уравнение для быстрых частиц, замыкаемые широкодиапазонным уравнением состояния. Результаты расчетов показали, что основным механизмом жидкофазного тепло- и массопереноса является термокапиллярная конвекция [15], причем она реализуется, когда длительность импульса много меньше характерного времени распространения тепла. В приповерхностном слое формируются два вихря, которые движутся в противоположных направлениях. Образование большого вихря обусловлено наличием силы поверхностного

натяжения, которая зависит от температуры, а образование малого вихря связано с тем, что приток жидкости, вовлекаемой в движение большого вихря, больше, чем отток, и, как следствие, происходит образование вихря застойной области [14, 15]. В работе [16] также обнаружено двухвихревое течение, причем по мере приближения к границе раздела «жидкость/твердое тело» два вихря объединяются в один, что приводит к стационарному течению. Отсюда следует, что картины течения однокомпонентных и бинарных сплавов при воздействии электронных пучков являются весьма сложными и неоднозначными.

Для сплавов с пятью и более компонентами картины течения расплавов практически не изучались. Это обусловлено отсутствием надежных данных о теплофизических свойствах, вязкости и поверхностном натяжении. Расчет поверхностного натяжения и вязкости для сплавов трех и более компонент уже является нетривиальной задачей [17], поэтому прибегают к экспериментальным данным. В работах [18, 19] для ВЭС CuBiSnInPb получены температурные зависимости поверхностного натяжения и кинематической вязкости. Для сплава AlCoCrFeNi такие данные отсутствуют в научной литературе, однако в работах [20, 21] приведены значения теплопроводности и плотности, которые можно экстраполировать на жидкое состояние. Для определения остальных параметров следует прибегнуть к правилу смеси $X = \sum_{i=1}^5 \alpha_i x_i$ (где α

и x – объемная доля и параметр i -го компонента смеси соответственно). Не менее важным фактором является испарение с поверхности материала, которое значимо при плотности теплового потока больше 10^5 Вт/см² [22, 23]. В этих работах показано, что возникает испарительно-капиллярная неустойчивость, которая приводит к появлению периодического изменения температуры, в результате чего возникают периодические термокапиллярные силы и силы давления отдачи паров, которые усиливают амплитуду начальных возмущений.

В настоящей работе будут проведены исследования характера конвективных течений в высокоэнтропийных расплавах AlCoCrFeNi и CuBiSnInPb с учетом испарения с поверхности материалов.

Постановка задачи

Для моделирования конвективных течений в высокоэнтропийных расплавах будем решать осесимметричную задачу для уравнений Навье-Стокса и теплопереноса [24], которые имеют вид:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \mu \Delta \vec{u}; \quad (1)$$

$$\nabla \vec{u} = 0; \quad \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T).$$

Схема расчетной области представлена на рис. 1. На границе AB задаются следующие условия:

$$-\vec{n} \cdot \vec{q} = q_0(r, t) - q_{out}(T) = \frac{E_s}{t_0} \exp\left(-\frac{r^2}{R_0^2}\right) \theta(t) - \dot{m}(T) L_V; \quad (2)$$

$$p = p_0 + p_V; \quad p_V = \frac{1 + \beta}{2} (p_c - p_0),$$

где p_V – давление отдачи паров; p_c – давление Клайперона;

$\dot{m}(T) = (1 - \beta) \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} p_0 \exp\left(\frac{L_V M (T - T_V)}{RT T_V}\right)$ – поток массы через границу раздела; M – молярная масса; R – универсальная газовая постоянная; T_V – температура испарения; T – температура; L_V – удельная теплота испарения; β – коэффициент; p_0 – начальное давление; E_s – плотность энергии пучка электронов; t_0 – длительность импульса; R_0 – радиус пятна облучения.

На границах BC, DC :

$$\vec{n} \cdot \vec{q} = 0; \quad \vec{n} \cdot \vec{v} = 0. \quad (3)$$

Поставленную задачу решали методом конечных элементов в программе Comsol Multiphysics. Для моделирования свободной поверхности использовался метод движущихся сеток. В таблице приведены входные параметры задачи. Значения поверхностного натяжения и кинематической вязкости сплава CuBiSnInPb брали из работ [18, 19], теплофизические постоянные (теплопроводность, плотность) сплава AlCoCrFeNi – из работ [20, 21]. Остальные параметры рассчитывали по правилу смеси.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 представлены картины течения ВЭС AlCoCrFeNi в различные моменты времени. На стадии нагрева при $t < t_0$ течение расплава носит ламинарный характер. Неустойчивость данного течения наблюдается на границе «расплав/твердое тело» (рис. 2, $a - z$). Одной из причин возникновения возмущений на данной границе является совместное протекание термокапиллярной неустойчивости и неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. На стадии нагрева также

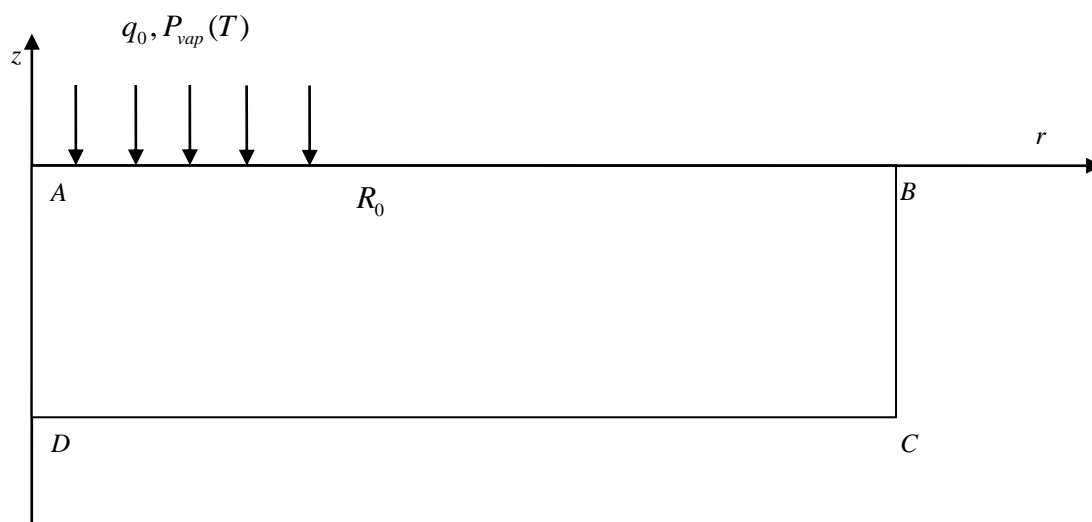


Рис. 1. Схема расчетной области
Fig. 1. The scheme of the calculation area

идет интенсивное плавление поверхностного слоя. Средняя толщина слоя, занятого расплавом к моменту окончания действия импульса t_0 , составляет примерно 10 мкм (рис. 2, з). Анализ картин течения расплава показывает, что на этой стадии происходит вынос расплава от центра к периферии и образование кратера. Стадия остывания характеризуется образованием вихревых течений (рис. 2, д – ж). Формирование вихрей происходит как на расстояниях, близких к радиусу пятна облучения, так и при $r > 0$. Это, в свою очередь, приводит к нарастанию возмущения

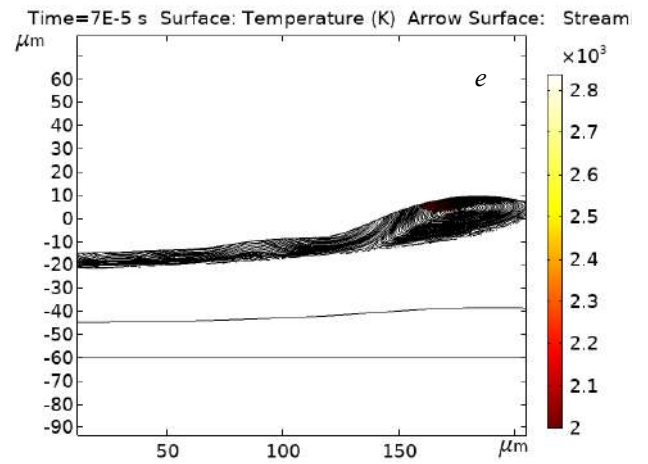
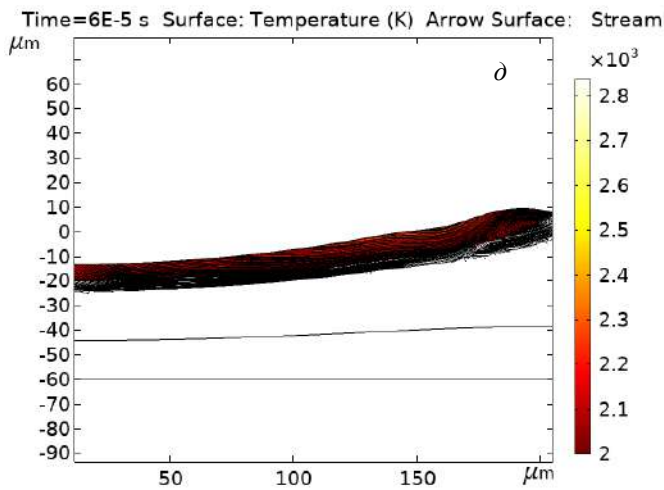
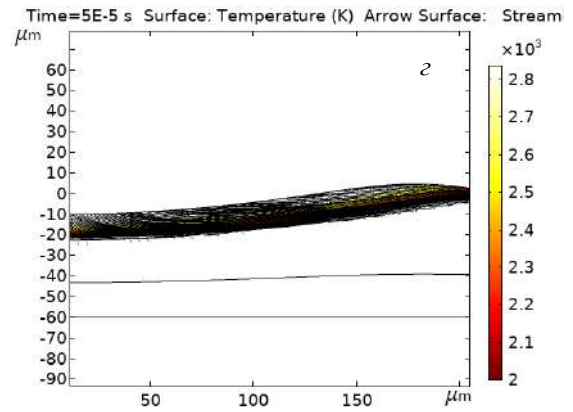
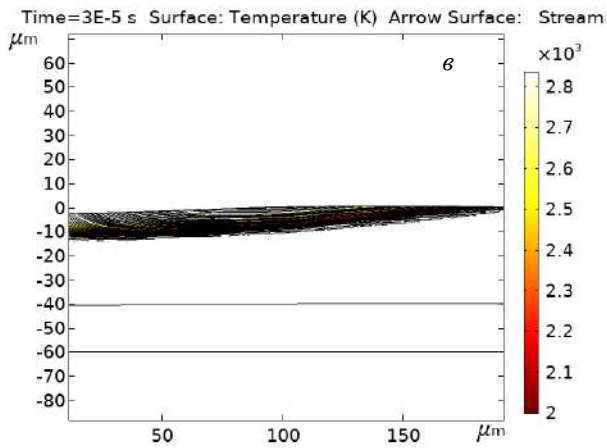
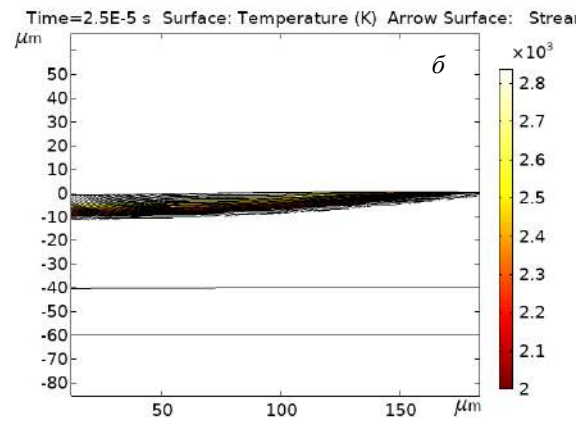
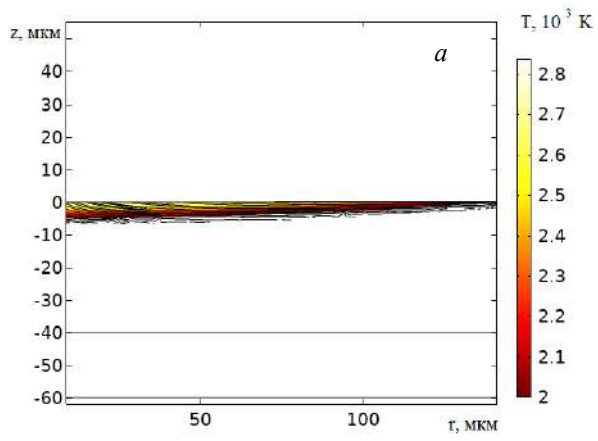
границы расплава и окончательному формированию кратера.

Подобное поведение расплава наблюдалось при обработке поверхности металлических материалов лазером [14], высокоэнергетическим электронным пучком [15]. Следует обратить внимание на то, что в периферийных областях пятна облучения расплавленные слои существуют при $t > 90$ мкс (рис. 2, ж), тогда как в центре кратера расплав прекращает свое существование при $t = 70$ мкс (рис. 2, е). Такая конфигурация ванны расплава обусловлена линейной

Т а б л и ц а

Характеристики материалов и входные параметры задачи
Table. Material characteristics and task input parameters

Обозначение, размерность	Сплав		Характеристика
	AlCoCrFeNi	CuBiSnInPb	
T_m , К	1768	1153	Температура плавления
T_v , К	2100	3000	Температура испарения
ρ_L , кг/м ³	6890	8675	Плотность жидкой фазы
ρ_S , кг/м ³	7000	9207	Плотность твердой фазы
ρ_v , кг/м ³	6700	8500	Плотность жидкой фазы при температуре испарения
ν , 10 ⁻⁷ м ² /с	6,56	2,00	Вязкость
γ_m , Н/м	1,55	0,55	Поверхностное натяжение
σ_T , 10 ⁻³ Н/(м·К)	-0,1	-0,023	Температурный коэффициент поверхностного натяжения
L_v , Дж/кг	6892	2179	Удельная теплота испарения
M , 10 ⁻³ кг/моль	49,0	142,8	Молярная масса
κ_s , Вт/(м·К)	102	117,5	Теплопроводность твердой фазы
κ_L , Вт/(м·К)	290	61	Теплопроводность жидкой фазы
κ_v , Вт/(м·К)	200	59	Теплопроводность жидкой фазы при температуре испарения
E_s , Дж/см ²	30	30	Плотность энергии пучка электронов
t_0 , мкс	50	50	Длительность импульса



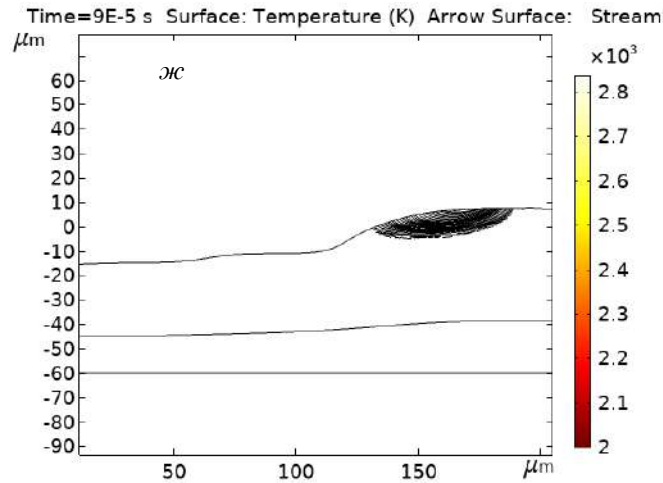


Рис. 2. Картины течения расплава AlCoCrFeNi с учетом температурных зависимостей теплопроводности, теплоемкости и плотности при 15 мкс (а), 25 мкс (б), 30 мкс (в), 50 мкс (з), 60 мкс (д), 70 мкс (е) и 90 мкс (жс) при $E_s = 30 \text{ Дж/см}^2$
 Fig. 2. AlCoCrFeNi melt flow patterns taking into account temperature dependences of thermal conductivity, heat capacity and density at 15 μs (a), 25 μs (б), 30 μs (в), 50 μs (з), 60 μs (д), 70 μs (е) and 90 μs (жс) at $E_s = 30 \text{ J/cm}^2$

зависимостью поверхностного натяжения от температуры [25].

В случае сплава CuBiSnInPb наблюдается такая же картина (рис. 3) с той лишь разницей, что процессы конвективного течения протекают быстрее из-за меньших по сравнению с предыдущим случаем значений поверхностного натяжения и температуры ликвидуса. Среднее значение глубины ванны расплава к моменту окончания действия импульса t_0 составляет примерно 15 мкм. Формирование вихря на границе ванны расплава наблюдается при $t > 65 \text{ мкс}$ (рис. 3, д – жс).

Расчеты, представленные на рис. 2 и 3, выполнены в предположении, что в первом граничном условии (2) $\theta(t) = 1$, а также в уравнениях модели не учитывали изменения теплопроводности и теплоемкости на границе фазового перехода.

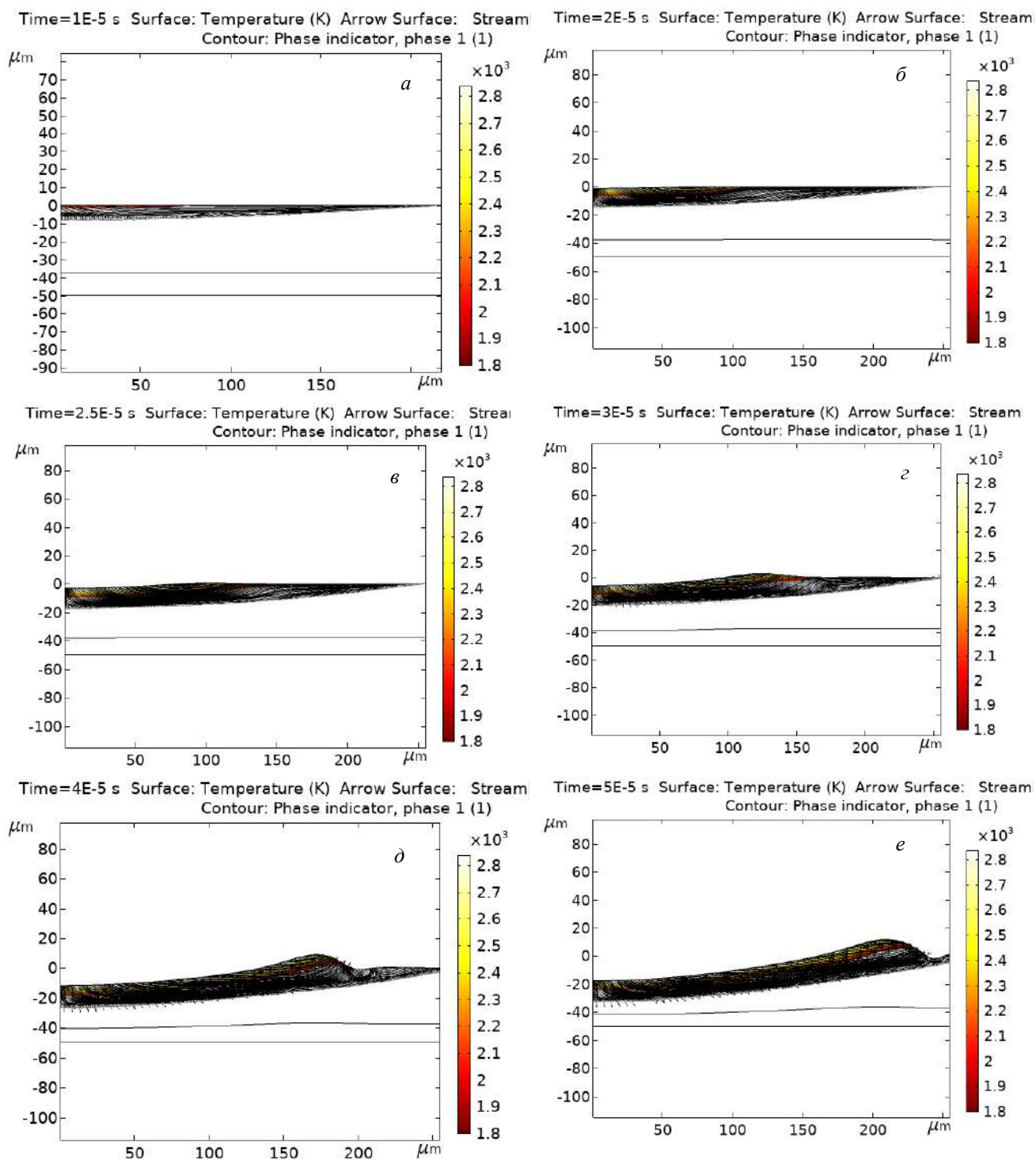
Теперь рассмотрим случай, когда такие изменения необходимо учитывать. Данные зависимости имеют вид:

$$C_p(T)\rho(T) = \begin{cases} C_S\rho_S, & T < T_L; \\ \frac{L_L\rho_L}{\Delta T_L}, & T_L \leq T < T_L + \Delta T_L; \\ C_L\rho_L, & T_L + \Delta T_L \leq T < T_V; \\ \frac{L_V\rho_V}{\Delta T_V}, & T_V \leq T < T_V + \Delta T_V; \\ C_V\rho_V, & T_V + \Delta T_V \leq T; \end{cases} \quad (4)$$

$$k(T) = \begin{cases} k_S, & T < T_L; \\ k_S + \frac{(k_L - k_S)(T - T_L)}{\Delta T_L}, & T_L \leq T < T_L + \Delta T_L; \\ k_L, & T_L + \Delta T_L \leq T < T_V; \\ k_S + \frac{(k_V - k_L)(T - T_V)}{\Delta T_V}, & T_V \leq T < T_V + \Delta T_V; \\ k_V, & T_V + \Delta T_V \leq T. \end{cases}$$

Для ВЭС AlCoCrFeNi в этом случае на стадии нагрева формирование расплавленного слоя начинается при $t = 30 \text{ мкс}$, при этом образуется вихревой паттерн (рис. 4, а, б). Затем по мере окончания действия импульса (рис. 4, в, з) на стадии остывания он развивается и приводит к возникновению возмущений на границе расплава. В отличие от предыдущего случая вихри образуются не на границе ванны расплава, а в ее центральной области. Глубина проплавления на момент окончания действия импульса составляет 15 мкм.

Для ВЭС CuBiSnInPb образование расплавленного слоя начинается при $t > 5 \text{ мкс}$ (рис. 5, а). В данном слое в процессе нагрева формируется многовихревой паттерн (рис. 5, б), который к моменту времени 20 мкс (рис. 5, в) перемещается к границе ванны расплава. Причиной его появления является меньшее по сравнению с ВЭС AlCoCrFeNi значение поверхностного натяжения, что облегчает возникновение термокапиллярной неустойчивости. К моменту окончания действия импульса (рис. 5, з) течение в объеме расплавленного слоя за исключением приграничной областей носит ламинарный характер. На стадии остывания на границе раздела «расплав/твердое тело»



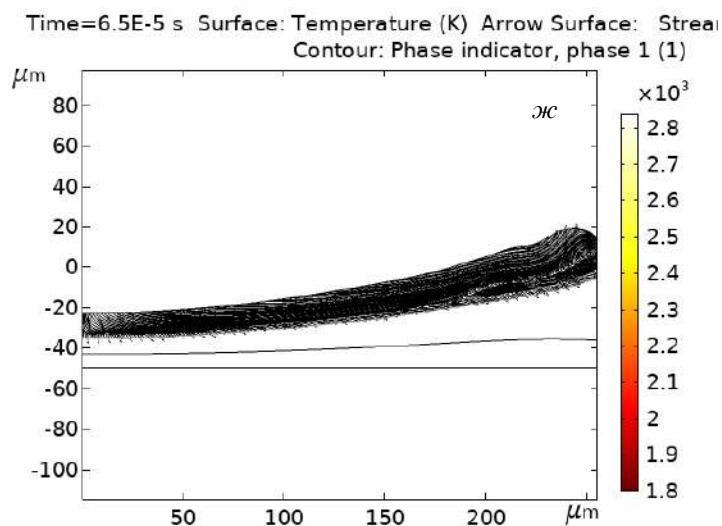


Рис. 3. Картины течения расплава CuBiSnInPb с учетом температурных зависимостей теплопроводности, теплоемкости и плотности при 10 мкс (а), 20 мкс (б), 25 мкс (в), 30 мкс (г), 40 мкс (д), 50 мкс (е) и 65 мкс (жс) при $E_s = 30 \text{ Дж/см}^2$

Fig. 3. CuBiSnInPb melt flow patterns taking into account temperature dependences of thermal conductivity, heat capacity and density at 10 μs (a), 20 μs (б), 25 μs (в), 30 μs (г), 40 μs (д), 50 μs (е) and 65 μs (жс) at $E_s = 30 \text{ J/cm}^2$

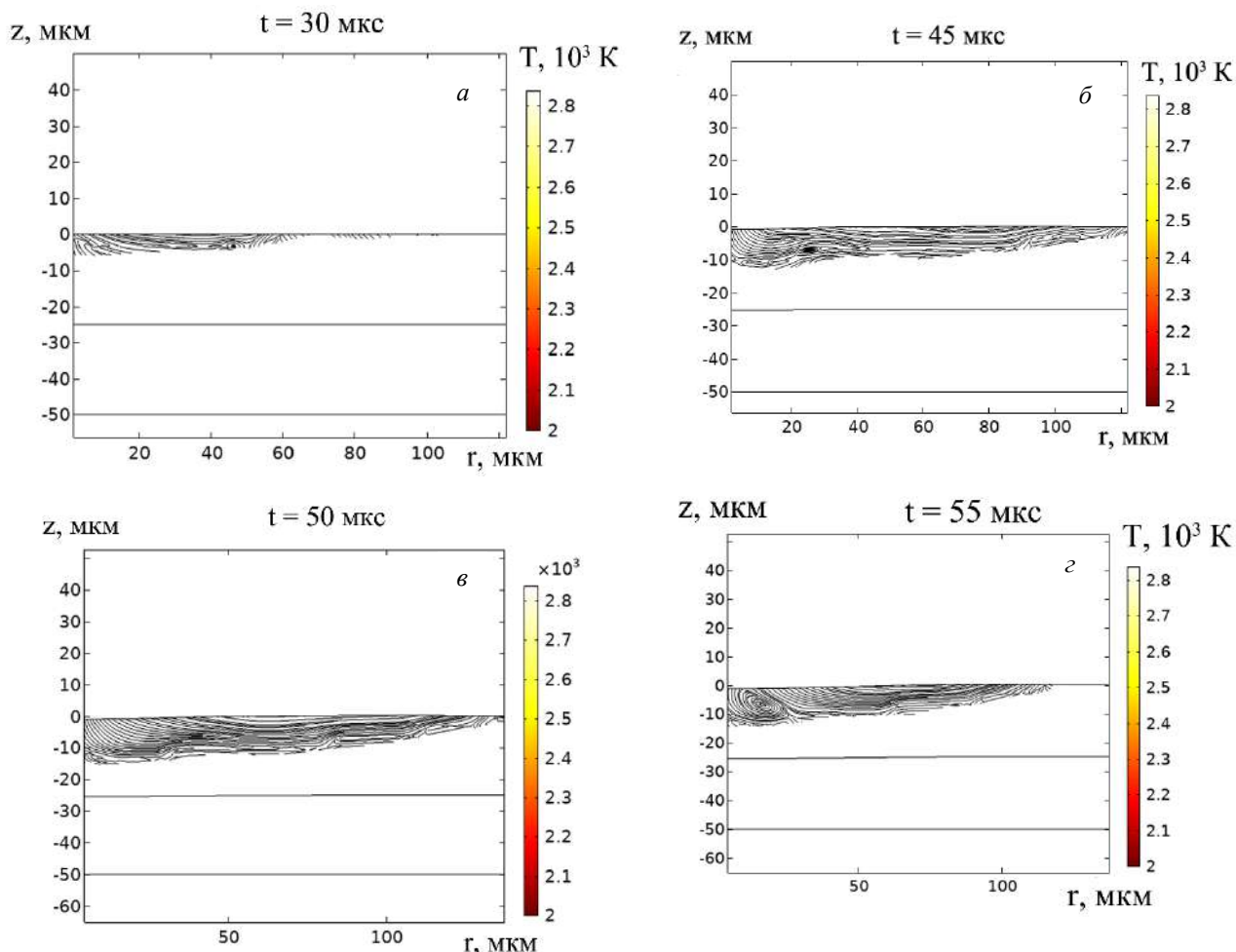


Рис. 4. Картины течения расплава AlCoCrFeNi с учетом температурных зависимостей теплопроводности, теплоемкости и плотности при 30 мкс (а), 45 мкс (б), 50 мкс (в) и 55 мкс (г) при $E_s = 30 \text{ Дж/см}^2$

Fig. 4. AlCoCrFeNi melt flow patterns taking into account temperature dependences of thermal conductivity, heat capacity and density at 30 μs (a), 45 μs (б), 50 μs (в) and 55 μs (г) at $E_s = 30 \text{ J/cm}^2$

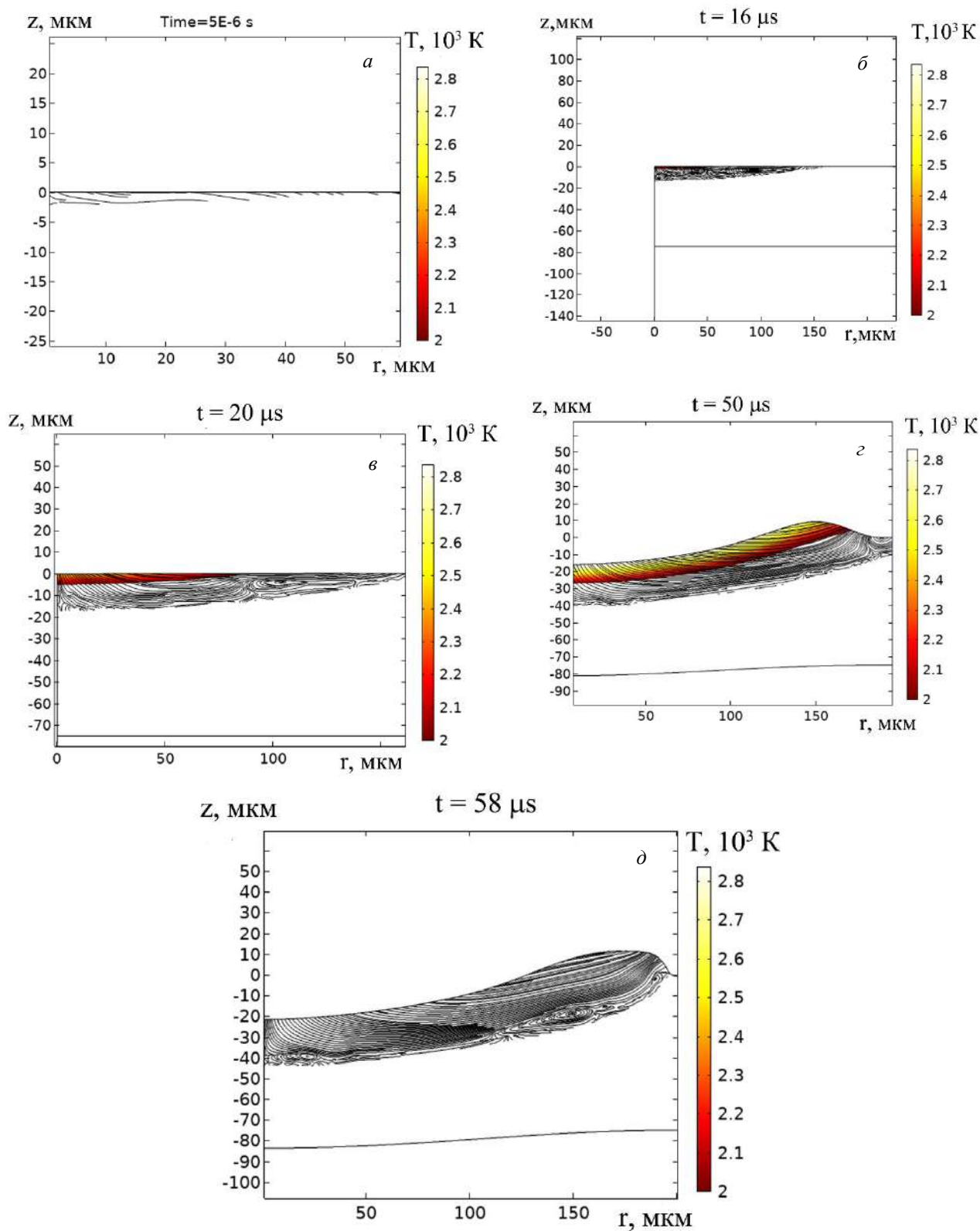


Рис. 5. Картины течения расплава CuBiSnInPb с учетом температурных зависимостей теплопроводности, теплоемкости и плотности при 5 мкс (*a*), 16 мкс (*б*), 20 мкс (*в*), 50 мкс (*г*) и 58 мкс (*д*) при $E_s = 30$ Дж/см²

Fig. 5. CuBiSnInPb melt flow patterns taking into account temperature dependences of thermal conductivity, heat capacity and density at 5 μs (*a*), 16 μs (*б*), 20 μs (*в*), 50 μs (*г*) and 58 μs (*д*) at $E_s = 30$ J/cm²

образуется комбинация термокапиллярной неустойчивости и неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, что приводит к образованию вихрей и, как следствие, к формированию микро- и наноструктур в материале (рис. 5, д).

Проведем численный анализ комбинированной термокапиллярной неустойчивости и неустойчивости Кельвина-Гельмгольца на примере сплава CuBiSnInPb методом конечных элементов с помощью модели работы, в которой изучалось двухслойное течение жидкости и рассматривалась устойчивость границ «покрытие/подложка» и «расплав/плазма». Применительно к настоящей работе будем считать «покрытием» расплав при температуре испарения, а «подложкой» материал при температуре плавления. На рис. 6 представлены результаты расчетов. Видно, что в момент окончания действия импульса при отсутствии поперечной скорости в «покрытии» (рис. 6, а) сформировался вихревой паттерн, обусловленный только термокапиллярной неустойчивостью. Этот паттерн, продвигается в глубь слоя и приводит на стадии остывания к возникновению возмущений поверхности раздела «покрытие/подложка» (рис. 6, б).

При значении поперечной скорости 5 м/с неустойчивость Кельвина-Гельмгольца подавляет термокапиллярную неустойчивость (рис. 7, а). Вихри, обусловленные этой неустойчивостью, не наблюдаются. Возмущения границы раздела «покрытие/подложка» обусловлены наличием неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (рис. 7, б). Вихревые течения наблюдаются только в «подложке».

Выводы

Проведено математическое моделирование воздействия низкоэнергетических сильноточных электронных пучков с плотностью энергии пучка электронов $E_s = 30$ Дж/см² и длительностью импульса 30 мкс на поверхность высокоэнтропийных сплавов AlCoCrFeNi и CuBiSnInPb. Установлено, что в расплавленном слое формируется многовихревой паттерн, механизмом образования которого является неустойчивость на границе раздела расплава и твердого тела. Эта неустойчивость обусловлена термокапиллярными силами и тангенциальным разрывом скоростей течений (неустойчивость Кельвина-Гельмгольца). Показано, что вихревые образования дольше всего существуют на расстояниях порядка радиуса пятна облучения, если не учитывать зависимости теплофизических параметров от температуры. При учете этой зависимости картина течения изменяется. Вихревое течение наблюдается в центре пятна облучения.

Анализ совместного протекания термокапиллярной неустойчивости и неустойчивости Кельвина-Гельмгольца показывает, что наличие поперечной скорости «покрытия» приводит к подавлению термокапиллярной неустойчивости. Вихревые течения наблюдаются только в «подложке».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gao B., Hu L., Li S.-W., Hao Y., Zhang Y.-D., Tu G.-F. Study on the nanostructure formation mechanism of hypereutectic Al–17.5 Si alloy induced by high current pulsed electron beam. *Applied Surface Science*. 2015;346:147–157. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.04.029>
2. Lu J., Song Z., Qin H., Huang H., Sui X., Weng Y., Mo Z., Wang K., Ren X. Surface nanocrystallization and mechanical properties of mold steel induced via scanning electron beam treatment. *Vacuum*. 2023;218:112634. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112634>
3. Fetzer R., Mueller G., An W., Weisenburger A. Metal surface layers after pulsed electron beam treatment. *Surface and Coatings Technology*. 2014;258:549–556. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.039>
4. Shulov V.A., Gromov A.N., Teryaev D.A., Engel'ko V.I. Application of high-current pulsed electron beams for modifying the surface of gas-turbine engine blades. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2016;57:256–265. <http://dx.doi.org/10.3103/S1067821216030147>
5. Марков А.Б., Мейснер Л.Л., Яковлев Е.В., Мейснер С.Н., Гудимова Е.Ю., Петров В.И. Кратерообразование на поверхности нержавеющей стали и никелида титана, облученных низкоэнергетическим сильноточным электронным пучком: морфология и топография. *Известия вузов. Физика*. 2015;58(9/3):173–177. EDN: VGAAAYD.
6. Lyu P., Chen Y., Liu Z., Cai J., Zhang C., Jin Y., Guan Q., Zhao N. Surface modification of CrFeCoNiMo high entropy alloy induced by high-current pulsed electron beam. *Applied Surface Science*. 2020;504:144453. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144453>
7. Lyu P., Peng T., Miao Y., Liu Z., Gao Q., Zhang C., Jin Y., Guan Q., Cai J. Microstructure and properties of CoCrFeNiMo_{0.2} high-entropy alloy enhanced by high-current pulsed electron beam. *Surface and Coatings Technology*. 2021;410:126911. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126911>
8. Shu C., Yao Z., Li X., Du W., Tao X., Yang H. Microstructure and wear mechanism of

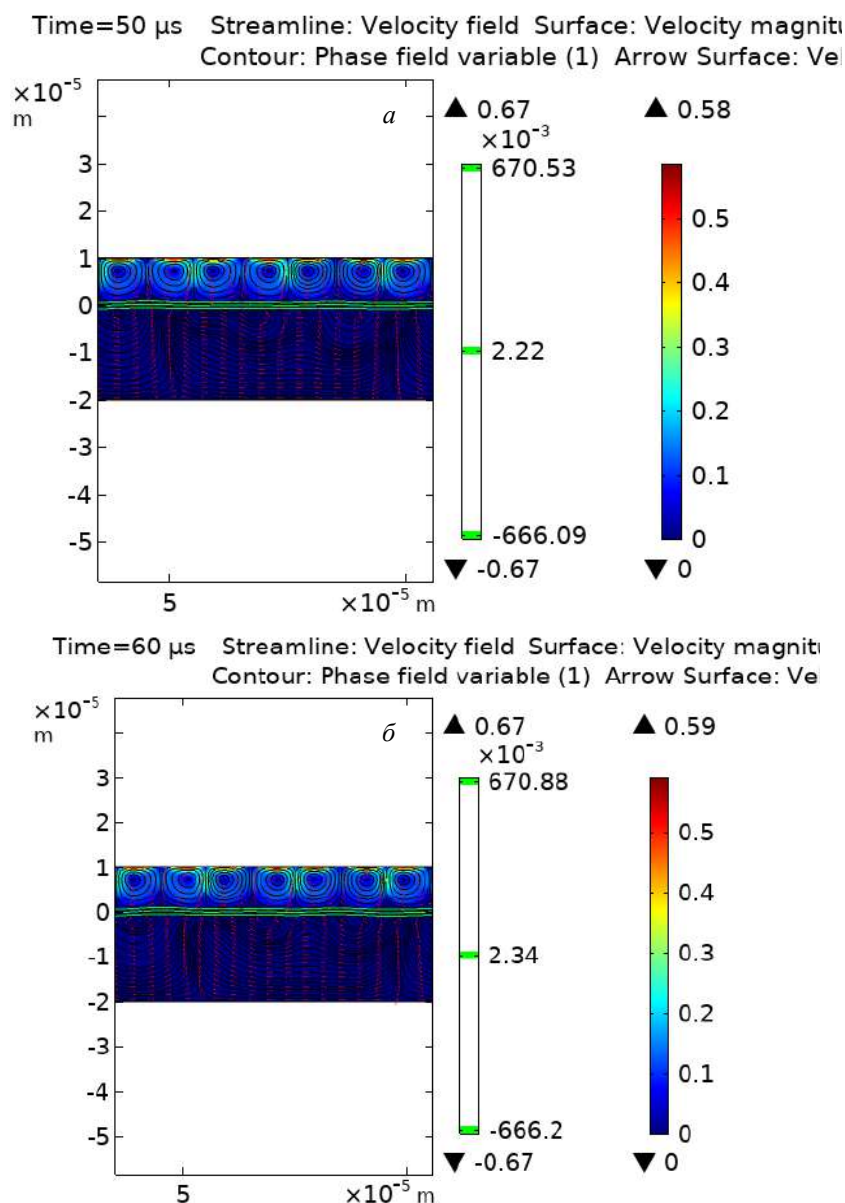


Рис. 6. Комбинированная термокапиллярная неустойчивость и неустойчивость Кельвина-Гельмгольца расплава CuBiSnInPb в моменты времени 50 мкс (а) и 58 мкс (б) при отсутствии поперечной скорости

Fig. 6. Combined thermocapillary instability and Kelvin-Helmholtz instability of the CuBiSnInPb melt at various time points at 50 μ s (a) and 58 μ s (b) in the absence of transverse velocity

- CoCrCuFeNiVx high entropy alloy by sintering and electron beam remelting. *Physica B: Condensed Matter*. 2022;638:413834. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2022.413834>
9. Popov V.V., Katz-Demyanetz A., Koptyug A. Selective electron beam melting of Al0.5CrMoNbTa0.5 high entropy alloys using elemental powder blend. *Heliyon*. 2019;5(2):e01188. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01188>
 10. Kuwabara K., Shiratori H., Fujieda T., Yamana K., Koizumi Y., A. Chiba. Mechanical and corrosion properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy fabricated with selective electron beam melting. *Additive Manufacturing*. 2018;23:264–271. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.006>
 11. Zhang M., Zhou X., Wang D., He L., Ye X., Zhang W. Additive manufacturing of in-situ strengthened dual-phase AlCoCuFeNi high-entropy alloy by selective electron beam melting. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022;893:162259. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162259>
 12. Yu T., Wang H., Han K., Zhang B. Microstructure and wear behavior of AlCrTiNbMo high-entropy alloy coating prepared by electron beam cladding on Ti600 substrate. *Vacuum*. 2022;199:110928. <http://dx.doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.110928>

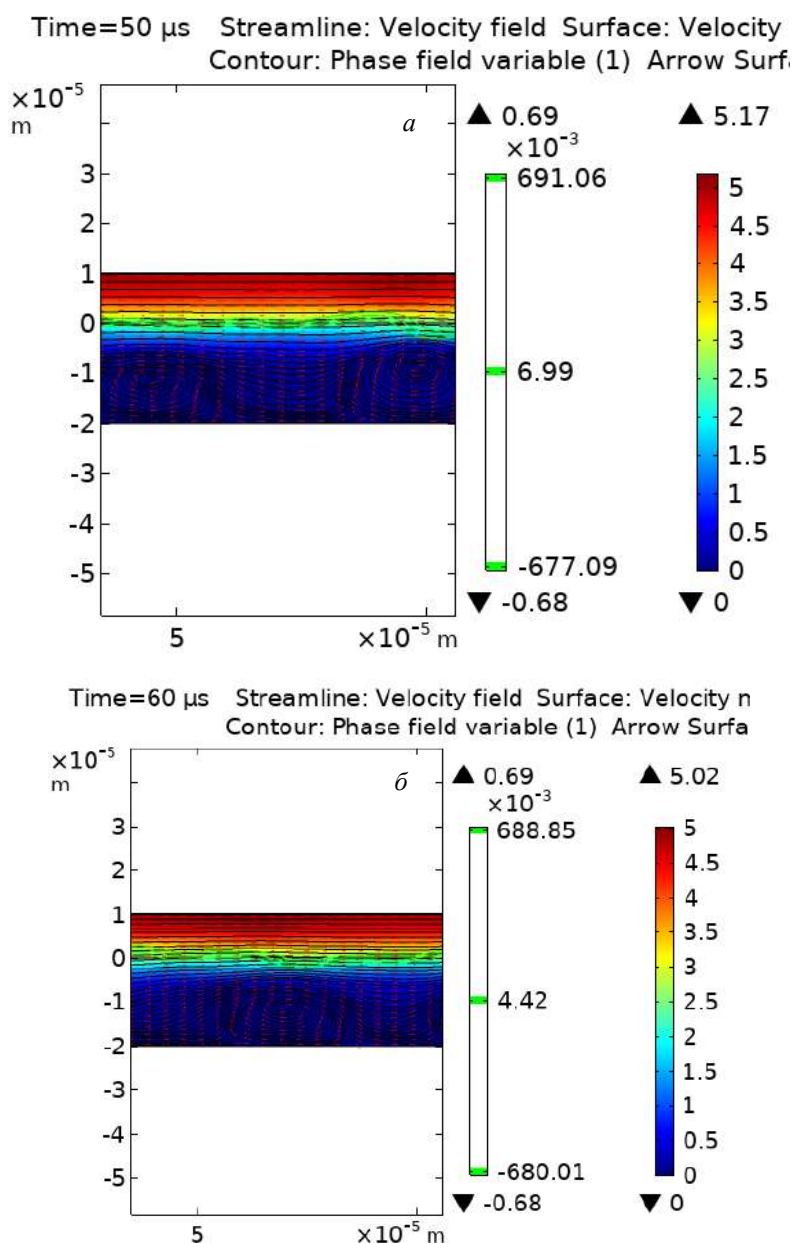


Рис. 7. Комбинированная термокапиллярная неустойчивость и неустойчивость Кельвина-Гельмгольца расплава CuBiSnInPb в моменты времени 50 мкс (а) и 58 мкс (б) при поперечной скорости 5 м/с

Fig. 7. Combined thermocapillary instability and Kelvin-Helmholtz instability of the CuBiSnInPb melt at various time points at 50 μs (a) and 58 μs (b) at the value of the transverse velocity 5 m/s

13. Cai J., Yao Y., Wei J., Guan Q., Lyu P., Ye Y., Li Y. Microstructure and transient oxidation behavior of NiCoCrAlYSiHf coating modified via high-current pulsed electron beam. *Surface and Coatings Technology*. 2021;422:127499. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127499>
14. Лейви А.Я., Талала К.А., Красников В.С., Яловец А.П. Модификация свойств конструкционных материалов интенсивными потоками заряженных частиц и плазмы. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение». 2016;16(1):28–55. <http://dx.doi.org/10.14529/engin160103>
15. Лейви А.Я., Яловец А.П. Моделирование воздействия интенсивных плазменных потоков на вещество. Челябинск: ИП Мякотин И.В., 2016:111.
16. Kuznetsov P.M., Feodorov V.A. Surface topology of Fe-Si alloy in the laser radiation exposure. *Materials Physics and Mechanics*. 2014;20:56–61.
17. Lambert P. Surface Tension in Microsystems Engineering Below the Capillary Length. Heidelberg: Springer.2013;327.
18. V'yukhin V.V., Chikova O.A., Tsepelev V.S. Surface tension of liquid high-entropy equiatomic alloys of a Cu–Sn–Bi–In–Pb sys-

- tem. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2017;91(4):613–616.
19. Chikova O.A., Il'in V.Y., Tsepelev V.S., V'yukhin V.V. Viscosity of high-entropy melts in the Cu-Bi-Sn-In-Pb system. *Inorganic Materials*. 2016;52(5):517–522.
 20. Uporov S., Bykov V., Pryanichnikov S., Shubin A., Uporova N. Effect of synthesis route on structure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy. *Intermetallics*. 2017;83:1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2016.12.003>
 21. Rohila S., Mane R.B., Ummethala G., Panigrahi B.B. Nearly full-density pressureless sintering of AlCoCrFeNi-based high-entropy alloy powders. *Journal of Materials Research*. 2019;34:777–786.
<https://doi.org/10.1557/jmr.2019.9>
 22. Samokhin A.A., Il'ichev N.N., Pivovarov P.A., Sidorenko A.V. Laser vaporisation of absorbing liquid under transparent cover. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. 2016;43(5):156–159.
<http://dx.doi.org/10.3103/S106833561605002X>
 23. Akhmanov S.A., Emel'yanov V.I., Koroteev N.I., Seminogov V.N. Interaction of powerful laser radiation with the surfaces of semiconductors and metals: nonlinear optical effects and nonlinear optical diagnostics. *Soviet Physics Uspekhi*. 1985;28:1084–1124.
<https://doi.org/10.1070/PU1985v028n12ABEH003986>
 24. Sarychev V.D., Granovskii A.Yu., Nevskii S.A., Konovalov S.V., Gromov V.E. Model of convection mass transfer in titanium alloy at low energy high current electron beam action. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017;168(1):012031.
<http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/168/1/012031>
 25. Debroy T. Welding in Digital Age. *Welding Journal*. 2015;94(4):58–64.
- ### REFERENCES
1. Gao B., Hu L., Li S.-W., Hao Y., Zhang Y.-D., Tu G.-F. Study on the nanostructure formation mechanism of hypereutectic Al–17.5 Si alloy induced by high current pulsed electron beam. *Applied Surface Science*. 2015;346:147–157.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.04.029>
 2. Lu J., Song Z., Qin H., Huang H., Sui X., Weng Y., Mo Z., Wang K., Ren X. Surface nanocrystallization and mechanical properties of mold steel induced via scanning electron beam treatment. *Vacuum*. 2023;218:112634.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.112634>
 3. Fetzer R., Mueller G., An W., Weisenburger A. Metal surface layers after pulsed electron beam treatment. *Surface and Coatings Technology*. 2014;258:549–556.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.039>
 4. Shulov V. A., Gromov A. N., Teryaev D. A., Engel'ko V. I. Application of high-current pulsed electron beams for modifying the surface of gas-turbine engine blades. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2016;57:256–265.
<http://dx.doi.org/10.3103/S1067821216030147>
 5. Markov A.B., Meisner L.L., Yakovlev E.V., Meisner S.N., Gudimova E.Y., Petrov V.I. Surface cratering on the surface of stainless steel and TiNi irradiated by a low-energy, high-current electron beam: morphology and topography. *Izvestiya Vuzov. Fizika*. 2015;58(9/3):173–177. (In Russ.).
 6. Lyu P., Chen Y., Liu Z., Cai J., Zhang C., Jin Y., Guan Q., Zhao N. Surface modification of CrFeCoNiMo high entropy alloy induced by high-current pulsed electron beam. *Applied Surface Science*. 2020;504:144453.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144453>
 7. Lyu P., Peng T., Miao Y., Liu Z., Gao Q., Zhang C., Jin Y., Guan Q., Cai J. Microstructure and properties of CoCrFeNiMo0.2 high-entropy alloy enhanced by high-current pulsed electron beam. *Surface and Coatings Technology*. 2021;410:126911.
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126911>
 8. Shu C., Yao Z., Li X., Du W., Tao X., Yang H. Microstructure and wear mechanism of CoCrCuFeNiVx high entropy alloy by sintering and electron beam remelting. *Physica B: Condensed Matter*. 2022;638:413834.
<https://doi.org/10.1016/j.physb.2022.413834>
 9. Popov V.V., Katz-Demyanetz A., Koptug A. Selective electron beam melting of Al0.5CrMoNbTa0.5 high entropy alloys using elemental powder blend. *Heliyon*. 2019;5(2):e01188.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01188>
 10. Kuwabara K., Shiratori H., Fujieda T., Yamanaoka K., Koizumi Y., A. Chiba. Mechanical and corrosion properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy fabricated with selective electron beam melting. *Additive Manufacturing*. 2018;23:264–271.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.006>
 11. Zhang M., Zhou X., Wang D., He L., Ye X., Zhang W. Additive manufacturing of in-situ strengthened dual-phase AlCoCuFeNi high-entropy alloy by selective electron beam melting. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022;893:162259.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162259>
 12. Yu T., Wang H., Han K., Zhang B. Microstructure and wear behavior of AlCrTiNbMo high-

- entropy alloy coating prepared by electron beam cladding on Ti600 substrate. *Vacuum*. 2022;199:110928.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.110928>
13. Cai J., Yao Y., Wei J., Guan Q., Lyu P., Ye Y., Li Y. Microstructure and transient oxidation behavior of NiCoCrAlYSiHf coating modified via high-current pulsed electron beam. *Surface and Coatings Technology*. 2021;422:127499.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127499>
 14. Leivi A.Ya., Talala K.A., Krasnikov V.S., Yalovets A.P. Modification of the properties of structural materials by intense flows of charged particles and plasma. *Bulletin of the South Ural State University. Skeria "Mechanical Engineering"*. 2016;16(1):28–55. (In Russ.).
<http://dx.doi.org/10.14529/engin160103>
 15. Leivi A.Ya., Yalovets A.P. *Modeling of the effect of intense plasma flows on matter*. Chelyabinsk: IP Myakotin I.V., 2016:111. (In Russ.).
 16. Kuznetsov P.M., Feodorov V.A. Surface topology of Fe-Si alloy in the laser radiation exposure. *Materials Physics and Mechanics*. 2014;20:56–61.
 17. Lambert P. *Surface Tension in Microsystems Engineering Below the Capillary Length*. Heidelberg: Springer. 2013;327..
 18. V'yukhin V.V., Chikova O.A., Tsepelev V.S. Surface tension of liquid high-entropy equiatomic alloys of a Cu–Sn–Bi–In–Pb system. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2017;91(4):613–616.
 19. Chikova O.A., Il'in V.Y., Tsepelev V.S., V'yukhin V.V. Viscosity of high-entropy melts in the Cu-Bi-Sn-In-Pb system. *Inorganic Materials*. 2016;52(5):517–522.
 20. Uporov S., Bykov V., Pryanichnikov S., Shubin A., Uporova N. Effect of synthesis route on structure and properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy. *Intermetallics*. 2017;83:1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.intermet.2016.12.003>
 21. Rohila S., Mane R.B., Ummethala G., Panigrahi B.B. Nearly full-density pressureless sintering of AlCoCrFeNi-based high-entropy alloy powders. *Journal of Materials Research*. 2019;34:777–786.
<https://doi.org/10.1557/jmr.2019.9>
 22. Samokhin A.A., Il'ichev N.N., Pivovarov P.A., Sidorin A.V. Laser vaporisation of absorbing liquid under transparent cover. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. 2016;43(5):156–159.
<http://dx.doi.org/10.3103/S106833561605002X>
 23. Akhmanov S.A., Emel'yanov V.I., Koroteev N.I., Seminogov V.N. Interaction of powerful laser radiation with the surfaces of semiconductors and metals: nonlinear optical effects and nonlinear optical diagnostics. *Soviet Physics Uspekhi*. 1985;28:1084–1124.
<https://doi.org/10.1070/PU1985v028n12ABEH003986>
 24. Sarychev V.D., Granovskii A.Yu., Nevskii S.A., Kononov S.V., Gromov V.E. Model of convection mass transfer in titanium alloy at low energy high current electron beam action. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017;168(1):012031.
<http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/168/1/012031>
 25. Debroy T. Welding in Digital Age. *Welding Journal*. 2015;94(4):58–64.
- Сведения об авторах**
Владимир Дмитриевич Сарычев, к.т.н., доцент кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: sarychev_vd@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4861-0778
SPIN-код: 3685-1643
- Сергей Андреевич Невский**, д.т.н., профессор кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: nevskiy.sergei@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-7032-9029
SPIN-код: 1424-5899
- Алексей Юрьевич Грановский**, к.т.н., старший научный сотрудник Управления научных исследований, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, 654007, ул. Кирова, зд. 42
E-mail: legatokun@gmail.com
ORCID: 0009-0006-4583-8431
SPIN-код: 5247-5227
- Людмила Петровна Бащенко**, к.т.н., доцент кафедры теплотехники и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: luda.baschenko@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1878-909X
SPIN-код: 5942-8145
- Диана Витальевна Шамсутдинова**, студент Института педагогического образования, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: dianas1009hamsutdinova@gmail.com
- Information about the authors:**
Vladimir D. Sarychev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
E-mail: sarychev_vd@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4861-0778
SPIN-код: 3685-1643

Sergei A. Nevskii, *Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel*, Siberian State Industrial University

E-mail: nevskiy.sergei@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-7032-9029

SPIN-код: 1424-5899

Aleksei Y. Granovsky, *Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Department of Scientific Research*, Siberian State Industrial University

E-mail: legatokun@gmail.com

ORCID: 0009-0006-4583-8431

SPIN-код: 5247-5227

Lyudmila P. Bashchenko, *Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology*, Siberian State Industrial University

E-mail: luda.baschenko@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1878-909X

SPIN-код: 5942-8145

Diana V. Shamsutdinova, *student*, Siberian State Industrial University

E-mail: dianas1009hamsutdinova@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 05.10.2023

После доработки 11.10.2023

Принята к публикации 24.10.2023

Received 05.10.2023

Revised 11.10.2023

Accepted 24.10.2023

Оригинальная статья

УДК 621.791.92:621.727:620.178

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-35-47

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВА ПЛАЗМЕННОЙ
НАПЛАВКИ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛЬЮ В СРЕДЕ АЗОТА**

© 2024 г. А. С. Чапайкин¹, В. Е. Громов¹, П. Чжан², Ю. Ф. Иванов³, Р.Е. Крюков¹,
В. В. Шляров¹, А. П. Семин¹

¹Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

² Шанхайский университет инженерных наук (КНР, Сунцзян, Шанхай)

³ Институт сильноточной электроники СО РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3)

Аннотация. Методами современного физического материаловедения проведены исследования структурно-фазовых состояний и свойств плазменной наплавки из быстрорежущей стали Р18Ю в защитно-легирующей среде азота. Основным элементом структуры наплавленного слоя являются зерна, размер которых составляет 7,0 – 22,5 мкм. Микрорентгеноспектральным анализом показано, что элементный состав зерен существенно зависит от анализируемого объема материала и определяется присутствующими включениями второй фазы. Плазменная наплавка нетоковедущей порошковой проволокой приводит к образованию слоя, основными фазами которого являются α -железо и карбиды состава Me_6C ($Me = Fe, W$), которые формируют каркасную сетку. Эта сетка представлена двумя морфологически различными типами: в виде протяженных прослоек и областей со структурой эвтектоидного типа. Включения карбидной фазы не содержат дислокационной субструктуры и характеризуются наличием изгибных контуров экстинкции, что свидетельствует об упругих напряжениях материала наплавки. Скалярная плотность хаотически распределенных дислокаций в зернах α -железа составляет $2,2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, а в сетчатой дислокационной субструктуре, объемная доля которой значительно меньше, $1,2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Методами просвечивающей электронной микроскопии в объеме зерен выявлены частицы карбида ванадия состава V_4C_3 игольчатой морфологии. Выполнена оценка параметра кристаллической решетки ($a = 2,888 \text{ \AA}$), размера областей когерентного рассеяния (44 нм) и концентрации углерода в твердом растворе α -железа (0,286 % (по массе)). Микротвердость наплавленного слоя составляет 4,7 ГПа, параметр износа $8,9 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$, коэффициент трения 0,7.

Ключевые слова: плазменная наплавка, порошковая проволока, электронная микроскопия, структура, механические свойства, трибологические свойства

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00186, <https://rscf.ru/project/23-19-00186/>.

Для цитирования: Чапайкин А.С., Громов В.Е., Чжан П., Иванов Ю.Ф., Крюков Р.Е., Шляров В.В., Семин А.П. Структурно-фазовые состояния и свойства плазменной наплавки быстрорежущей сталью в среде азота. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):35–47. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-35-47](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-35-47)

Original article

STRUCTURAL-PHASE STATES AND PROPERTIES OF PLASMA SURFACING WITH HIGH-SPEED STEEL IN A NITROGEN ENVIRONMENT

© 2024 A. S. Chapaikin¹, V. E. Gromov¹, P. Zhang², Yu. F. Ivanov³, R. E. Kryukov¹, V. V. Shlyarov¹, A. P. Semin¹

¹**Siberian State Industrial University** (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

²**Shanghai University of Engineering Sciences** (PRC, Songjiang, Shanghai)

³**Institute of High-Current Electronics SB RAS** (2/3 Akademicheskoy Ave., Tomsk, 634055, Russian Federation)

Abstract. Using the methods of modern physical materials science, studies of the structural-phase states and properties of plasma surfacing from high-speed steel R18Yu in a protective alloying environment of nitrogen were carried out. The main element of the structure of the deposited word is grains, the size of which is 7.0 – 22.5 microns. It has been shown that plasma surfacing with a non-current-carrying flux-cored wire leads to the formation of a layer, the main phases of which are α -Fe and carbides of composition M_6C ($M = Fe, W$), which form a frame mesh represented by two morphologically different types in the form extended layers and areas with a eutectoid-type structure. The inclusion of the carbide phase does not contain a dislocation sub-structure and is characterized by the presence of flexural extinction contours, which indicates elastic stresses of the surfacing material. The scalar density of chaotically distributed dislocations in α -Fe grains is $2.2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, and in the network dislocation substructure $1.2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. Using transmission electron microscopy, particles of vanadium carbide of composition V_4C_3 with needle-like morphology were identified in the volume of grains. The crystal lattice parameter ($a = 2.888 \text{ \AA}$), the size of coherent scattering regions (44 nm) and the carbon concentration in the α -Fe solid solution (0.286 wt.%) were assessed. The microhardness of the deposited layer is 4.7 GPa, the wear parameter is $8.9 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, the thorn coefficient is 0.7.

Keywords: plasma surfacing, flux-cored wire, electron microscopy, structure, mechanical properties, tribological properties

Funding: The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 23-19-00186, <https://rscf.ru/project/23-19-00186/>.

For citation: Chapaikin, A.S., Gromov, V.E., Zhang, P., Ivanov, Yu.F., Kryukov, R.E., Shlyarov, V.V., Semin, A.P. Structural-phase states and properties of plasma surfacing with high-speed steel in a nitrogen environment. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):35–47. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-35-47](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-35-47)

Введение

Для эффективной защиты металлов и сплавов от различных видов внешних воздействий (износа, коррозии, статических и динамических нагрузок) в горнодобывающей, строительной и металлургической отраслях используется наплавка, которая обеспечивает высокие механические свойства [1, 2]. Получение покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками, обеспечивающими повышение надежности и долговечности работы изделий в экстремальных условиях, характеризующихся повышенными механическими нагрузками, износом, коррозией, наличием агрессивных сред и циклическим воздействием, является фундаментальной и прак-

тически значимой задачей [3]. Данную задачу решают путем разработки и использования в технологиях новых наплавочных материалов, содержащих химические соединения, твердые сплавы, твердые растворы [4]. Главным фактором, определяющим упрочнение, является выбранный материал покрытия, отличающийся от основного материала детали и обеспечивающий требуемые свойства поверхности [5].

В последние годы получили развитие научные исследования и практические разработки в области плазменной наплавки сталями высокой твердости (P18, P6M5, P2M9 и другие) с применением азота в качестве легирующего элемента [6]. Легирование азотом позволяет значительно

повысить коррозионную стойкость сплавов, прочность, ударостойкость, абразивную износостойкость, другие свойства [7]. Это оказывается возможным вследствие повышения микротвердости структурных составляющих покрытий [8]. Плазменная наплавка на обратной полярности в защитно-легирующей среде азота с нетоковедущей присадочной порошковой проволокой обладает рядом преимуществ перед другими способами наплавки [9].

Для обоснования выбора материала наплавки, соответствующего условиям его эксплуатации, необходимо проведение тщательных исследований структуры, фазового состава [10, 11], механических и трибологических свойств [12, 13] и их эволюции при последующей термообработке [14 – 16].

Выяснение физической природы формирования повышенной твердости и износостойкости плазменной наплавки из быстрорежущих сталей возможно лишь при использовании высокоинформативного метода просвечивающей электронной микроскопии [17 – 19]. Возможности этого метода наглядно продемонстрированы в работах [4, 20 – 22].

Целью настоящей работы являлось исследование структуры, элементного и фазового составов, механических и трибологических свойств наплавленного на сталь марки 30ХГСА слоя стали Р18Ю.

Методы и принципы исследования

Образцы для исследований получали плазменной наплавкой в среде азота нетоковедущей порошковой проволокой ПП-Р18Ю диаметром 3,7 мм на сталь марки 30ХГСА, содержащей 0,3 % С, 0,9 % Cr, 0,8 % Mn, 0,9 % Si (по массе). Сталь Р18Ю содержит, % (по массе): С 0,87; Cr 4,41; W 17,00; Mo 0,10; V 1,50; Ti 0,35; Al 1,15; N 0,06. Плазменная наплавка проводилась с расходом защитного газа (азота) $Q_{\text{защ}} = 20 \div 22$ л/мин; расходом плазмообразующего газа (аргона) $Q_{\text{плазм}} = 6 \div 8$ л/мин. Режим плазменной наплавки на установке УД-417: сварочный ток 140 – 160 А; напряжение на дуге 50 – 55 В; скорость наплавки 18 м/ч; скорость подачи проволоки 60 м/ч; смещение зенита 10 – 12 мм; длина дуги 20 мм.

Для исследований образцы после электроискровой резки механически выравнивали на мелкой наждачной бумаге и алмазной пасте, а после этого электролитическим способом стравливали деформированный слой и выравнивали поверхность.

Исследования структуры и элементного состава наплавленного слоя осуществляли на сканирующем электронном микроскопе КУКУ-ЕМ6900 с термоэмиссионным вольфрамовым катодом. Предварительно образцы подвергали травлению 4 %-ным спиртовым раствором азот-

ной кислоты с выдержкой в нем в течение 10 с. Фазовый состав и дефектную субструктуру наплавленного слоя изучали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии (прибор JEM-2100, JEOL) [17 – 19]. Объектом исследования являлись фольги, изготовленные методом электрополировки в растворе хромового ангидрида (CrO_3 , 50 г) в ортофосфорной кислоте (H_3PO_4 , 450 мл). Состояние кристаллической решетки и фазовый состав наплавленного слоя изучали методами рентгеноструктурного анализа. Съемки осуществляли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-8Н, оснащенный параболическим зеркалом на первичном пучке и позиционно-чувствительным детектором Mythen 2R 1D (640 каналов, размер одного стрипа 50 мкм). Ускоряющее напряжение, подаваемое на рентгеновскую трубку, составляло 40 кВ, ток – 20 мА. Съемки осуществляли без вращения образца. Во всех случаях угловой диапазон по 2θ составлял 10 – 140°, шаг сканирования на скоростных съемках – 0,5°, время экспозиции – 5 с. Идентификация фазового состава, качественный и количественный фазовый анализ, а также уточнение параметров структуры выполнены при помощи программного комплекса «КДА» (Кристаллография и дифракционный анализ) со встроенной картотеккой порошковых стандартов (АО ИЦ «Буревестник», версия 2023-01-24-144022.8dec10c0f).

Исследования микротвердости проводились методом Виккерса на приборе HVS-1000. Индентором служила четырехгранная алмазная пирамида, нагрузка на которую составляла 1 Н. Исследования твердости проводили на приборе ТТХ-ННТ при следующих параметрах: частота 10,0 Гц, максимальная нагрузка 50,00 мН, скорость нагружения 100,00 мН/мин, скорость разгрузки 100,00 мН/мин, пауза 5,0 с, алмазная пирамида Берковича.

Трибологические испытания осуществляли на трибометре Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic) в условиях сухого трения при комнатной температуре при следующих параметрах испытаний: шарик из оксидной керамики состава Al_2O_3 диаметром 6 мм; радиус дорожки трения 2 мм; путь, пройденный контртелом, 100 м; нагрузка на индентор 10 Н.

Результаты и их обсуждение

Элементный анализ наплавленного слоя (табл. 1) позволил выявить наличие всех основных химических элементов, характерных для порошковой проволоки ПП-Р18Ю. Следует отметить присутствие в наплавленном слое атомов кислорода, что может свидетельствовать о возможном образовании включений оксидной фазы.

Элементный состав наплавки
Table 1. Elemental composition of surfacing

Элемент	Тип линии	Содержание элемента		
		% (по массе)	δ , % (по массе)	% (атом.)
C	К-серия	27,21	0,15	63,48
O	К-серия	2,74	0,08	4,80
Al	К-серия	1,06	0,02	1,10
V	К-серия	1,62	0,01	0,89
Cr	К-серия	3,26	0,02	1,76
Mn	К-серия	0,35	0,01	0,18
Fe	К-серия	51,72	0,12	25,95
W	L-серия	12,02	0,06	1,83

Кристаллизация слоя, полученного плазменной наплавкой на сталь марки 30ХГСА в среде азота нетоковедущей порошковой проволокой ПП-Р18Ю, приводит к формированию структуры дендритно-ячеистого типа, характерное изображение которой приведено на рис. 1. Исследования структуры методами сканирующей электронной микроскопии осуществляли с использованием вторичных электронов (SE, secondary electrons) и обратно отраженных электронов (BSE, back scattered electrons). Так как сигнал вторичных электронов очень чувствителен к топографии поверхности, то с помощью SE-детектора получают изображения, передающие рельеф поверхности образца (рис. 1, а). Вторичные электроны имеют малую энергию (<50 эВ), поэтому мельчайшие препятствия, встретившиеся на пути вторичных электронов, поглощают их, что и объясняет чувствительность сигнала вторичных электронов к рельефу поверхности.

Детектор обратно отраженных электронов служит для наблюдения композиционного контраста. Отраженные электроны – это та часть

первичного электронного пучка, которая упруго отразилась от поверхности образца. Свойство материала отражать от себя электроны меняется в зависимости от атомного номера, поэтому BSE-изображения позволяют визуализировать разницу в среднем атомном номере между компонентами образца. Известно, что чем светлее выглядит объект на BSE-изображении, тем выше его средний атомный номер. Анализируя контраст изображения структуры наплавленного слоя, представленного на рис. 1, б, можно выделить разную яркость в градациях серого. А именно, протяженные прослойки по границам зерен (дендритов) имеют наиболее светлый контраст, что указывает на формирование этих прослоек наиболее тяжелыми элементами, то есть прослойки обогащены атомами вольфрама. Включения округлой (глобулярной) формы, расположенные в структуре хаотически и имеющие наиболее темный контраст, сформированы легкими химическими элементами, то есть обогащены атомами алюминия и, возможно, атомами кислорода.

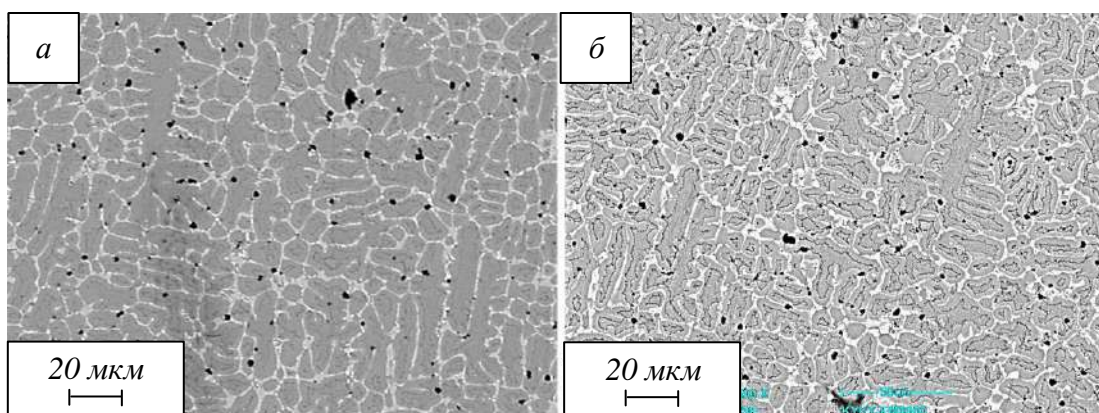


Рис. 1. Электронно-микроскопическое изображение наплавленного слоя:
а – СЭМ во вторичных электронах (с помощью SE-детектора); б – СЭМ в обратно отраженных электронах (с помощью BSE-детектора)

Fig. 1. Electron microscopic image of the deposited layer:
а – SEM in secondary electrons (using an SE detector); б – SEM in back-reflected electrons (using a BSE detector)

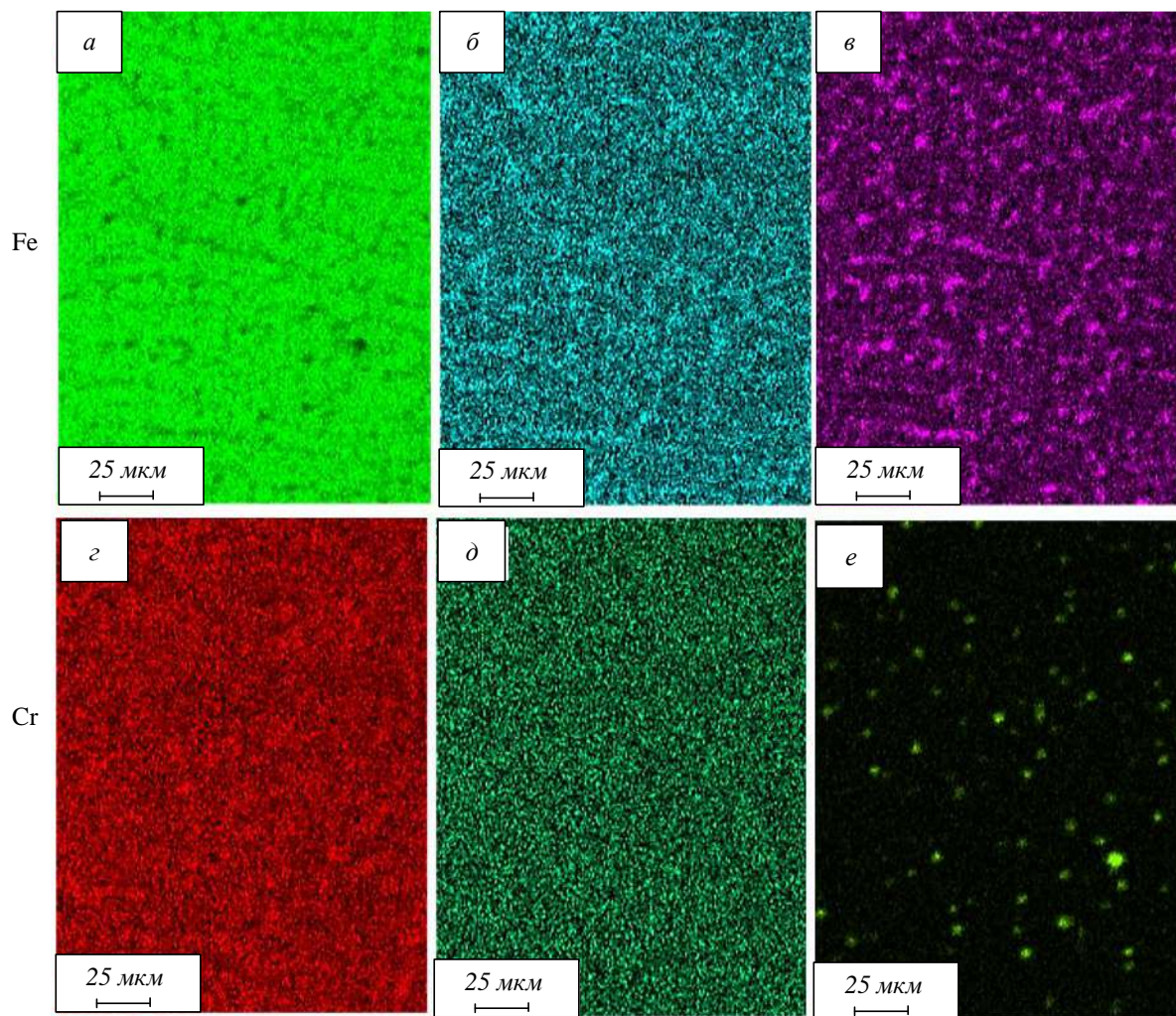


Рис. 2. Изображение участка наплавленного слоя, выявленное в характеристическом рентгеновском излучении атомов Fe (а), W (б), V (в), Cr (з), Mn (д), Al (е)

Fig. 2. Image of a section of the deposited layer, revealed in the characteristic X-ray radiation of Fe (a), W (б), V (в), Cr (з), Mn (д), Al (е) atoms

Действительно, методами микрорентгеноспектрального анализа установлено, что прослойки второй фазы, расположенные по границам зерен (дендритов), обогащены атомами тяжелых элементов (W, V, Cr); зерна обогащены атомами сравнительно более легких элементов (Fe, Mn, Cr); включения округлой формы обогащены атомами наиболее легких элементов (Al) (рис. 2).

Исследования методами сканирующей электронной микроскопии травленных шлифов наплавленного слоя позволили детализировать структуру материала. По морфологическому признаку условно были выделены характерные составляющие структуры, отличающиеся формой, размерами и взаимным расположением (рис. 1, 3).

Основным элементом структуры наплавленного слоя являются зерна, размер которых изменяется в пределах от 7,0 до 22,5 мкм. В большинстве случаев объем зерен по контрасту делится на две области (рис. 3): центральную, имеющую сравнительно более темный контраст

(область II), и периферийную, имеющую более светлый контраст (область I). Центральная область зерна характеризуется наличием включений второй фазы (рис. 3, в). Как отмечалось выше, наплавленный слой характеризуется наличием каркасной сетки, разделяющей материал наплавки на зерна (ячейки) (рис. 1). Каркасная сетка представлена двумя морфологически различными типами (рис. 3): протяженными сравнительно тонкими прослойками (область IV) и областями, имеющими структуру эвтектоидного типа (область III).

Фазовый состав наплавленного слоя изучали методами рентгеноструктурного (рентгенофазового) анализа. Установлено, что основной фазой наплавленного слоя является α -железо (твердый раствор на основе ОЦК кристаллической решетки железа) (табл. 2). Помимо данной фазы отчетливо идентифицируется фаза карбида, в общем виде имеющего формулу Me_6C или $(FeW)_6C$. Возможно присутствие следов карбидов другого элементного состава. Можно отме-

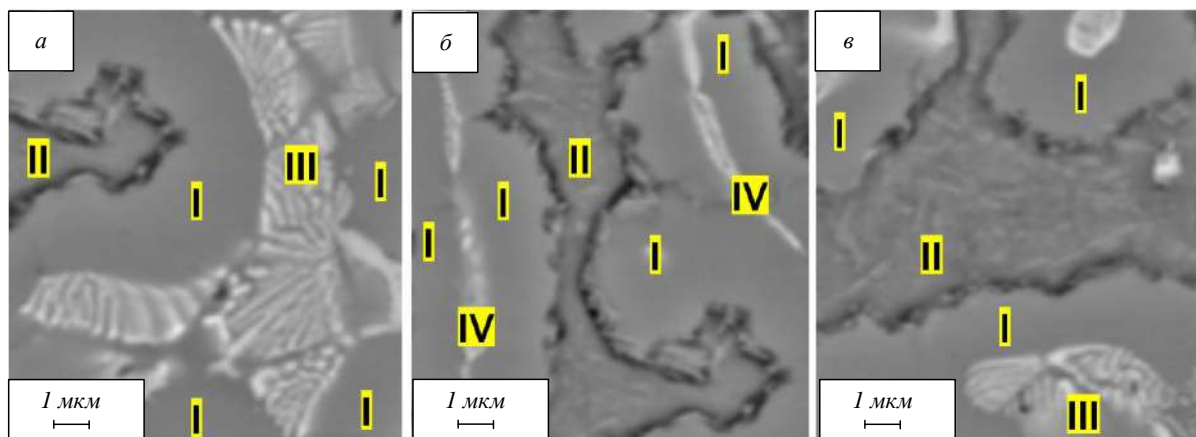


Рис. 3. Структура наплавленного слоя, выявленная методами сканирующей электронной микроскопии травленого шлифа
 Fig. 3. The structure of the deposited layer, revealed by scanning electron microscopy of an etched section

тить сравнительно большие значения параметра кристаллической решетки α -железа (табл. 2). Принимая во внимание, что параметр решетки a_0 чистого железа 2,866 Å, и учитывая, что основным химическим элементом, способным существенно увеличить параметр решетки α -железа, является углерод, можно оценить концентрацию углерода ΔC в твердом растворе на основе α -железа. Используя соотношение, представленное в работах [20 – 22], получаем $\Delta C = 0,55\%$ (по массе), с учетом относительно содержания α -железа в наплавленном слое (0,52) концентрация атомов углерода в твердом растворе будет составлять 0,286 % (по массе).

Фазовый и элементный составы и состояние дефектной субструктуры наплавленного слоя анализировали методами электронной дифракционной микроскопии и рентгеноструктурного анализа (рис. 4). Результаты микрорентгеноспектрального анализа участка карбидного каркаса приведены на рис. 5 и в табл. 3. Отчетливо видно, что основными элементами каркаса являются углерод, ванадий, хром, железо, вольфрам, то есть элементы, активно участвующие в формировании карбидной фазы.

Анализ микроэлектроннограмм, полученных с участков карбидного каркаса, показал, что наиболее часто выявляются рефлексы карбида состава Me_6C ($Fe_3W_3C-Fe_4W_2C$), реже обнаруживаются включения, имеющие состав $Me_{12}C$ и $Me_{23}C_6$. На рис. 6 представлены результаты электронно-микроскопического анализа структуры карбидного каркаса, демонстрирующие присутствие карбида Me_6C ($Fe_3W_3C-Fe_4W_2C$). Можно отметить, что включения карбидной фазы не содержат дислокационной субструктуры и характеризуются наличием изгибных экстинкционных контуров (рис. 6). Последнее свидетельствует об упругих напряжениях материала наплавленного слоя.

Вторым основным элементом структуры наплавленного слоя являются зерна α -фазы. Светлопольный анализ дефектной субструктуры зерен выявил наличие в них дислокационной субструктуры. Наблюдаются зерна, в которых

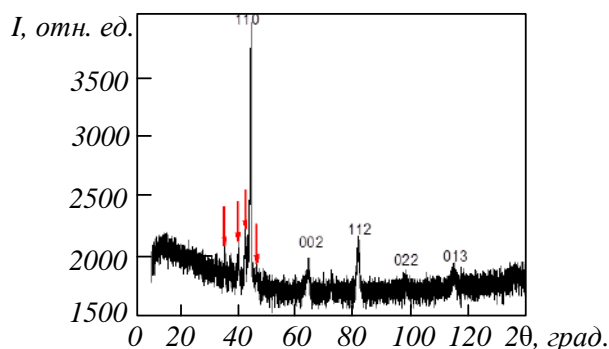


Рис. 4. Фрагмент рентгенограммы, полученной с наплавленного слоя (стрелками указаны дифракционные линии карбида состава Fe_3W_3C)

Fig. 4. Fragment of an X-ray photograph obtained from the deposited layer (arrows indicate diffraction lines of carbide with composition Fe_3W_3C)

Т а б л и ц а 2

Расчетные данные, полученные при анализе рентгенограммы, представленной на рис. 4.
 Table 2. Calculated data obtained from the analysis of the X-ray diffraction pattern shown in fig. 4

Фаза	Доля фазы, % (по массе)	a , Å	Размеры ОКР, нм
Fe_3W_3C	48	11,096	65
α -Fe	52	2,888	44

Результаты анализа элементного состава фрагментов карбидного каркаса
Table 3. Results of analysis of the elemental composition of fragments of the carbide framework

Спектр	Содержание элемента, % (по массе)						
	C	Al	V	Cr	Mn	Fe	W
1	3,56	0,14	3,93	3,77	0,15	25,18	63,28
2	5,75	0,03	3,52	4,06	0,28	23,98	62,43

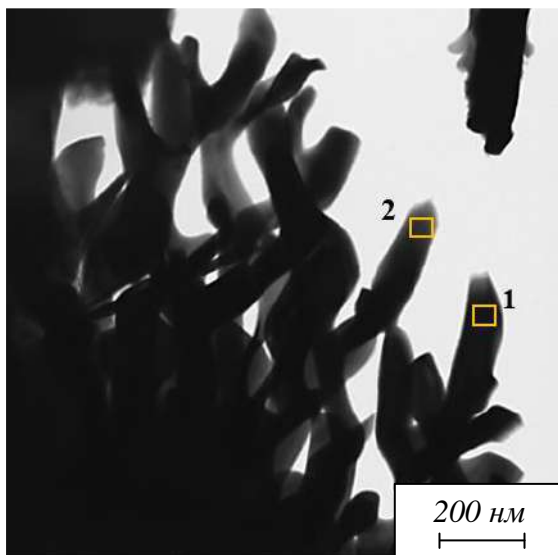


Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение структуры наплавленного слоя (выделены области анализа элементного состава)

Fig. 5. Electron microscopic image of the structure of the deposited layer (areas of elemental composition analysis are identified)

дислокации распределены хаотически. В этом случае скалярная плотность дислокаций $\langle \rho \rangle$ составляет $2,2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Реже наблюдается сетчатая дислокационная субструктура: в этом случае скалярная плотность дислокаций существенно выше и составляет $1,2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа различных областей объема зерен α -фазы (табл. 4) свидетельствуют, что элементный состав зерна существенным образом зависит от анализируемого объема материала и определяется присутствующими в зерне включениями второй фазы.

На рис. 7 приведен пример анализа включений второй фазы, образующихся в зернах α -фазы в процессе формирования наплавленного слоя. Методами светлопольного (рис. 7, а) и темнопольного (рис. 7, з) анализа в объеме зерна выявлено присутствие частиц второй фазы игольчатой морфологии. Анализ микроэлектронограммы (рис. 7, б) позволяет утверждать, что данные частицы являются карбидом ванадия состава V_4C_3 .

Исследование прочностных свойств наплавленного слоя показали, что микротвердость по-

верхностного слоя составляет 4,7 ГПа. Трибологические свойства наплавленного слоя, выявленные в условиях сухого трения, показали, что параметр износа поверхностного слоя составляет $8,9 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$; коэффициент трения 0,7.

Выводы

В работе выполнены исследования элементного и фазового составов, структуры, механических и трибологических свойств поверхностного слоя стали Р18Ю, сформированного плазменной наплавкой в среде азота нетоковедущей порошковой проволокой ПП-Р18Ю диаметром 3,7 мм на сталь марки 30ХГСА. Плазменная наплавка приводит к формированию слоя, основными фазами которого являются α -железо (твердый раствор на основе ОЦК кристаллической решетки железа) и карбид состава Me_6C ($Fe_3W_3C-Fe_4W_2C$). Выявлено, что карбид состава Me_6C ($Fe_3W_3C-Fe_4W_2C$) формирует каркасную сетку и является основной упрочняющей фазой наплавленного слоя. Установлено, что процесс формирования наплавленного слоя сопровождается распадом твердого раствора на основе α -железа с формированием в объеме зерен наноразмерных частиц карбидной фазы. Микротвердость слоя составляет 4,7 ГПа, параметр износа $8,9 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$, коэффициент трения 0,7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Технологии наплавки деталей горно-металлургического комплекса сталями высокой твердости* / Н.Н. Малущин, Д.В. Валуйев, В.Л. Осетковский, С.А. Солодский. Томск: Изд-во ТПУ, 2015:212.
2. *Упрочнение теплостойких сплавов плазмой в среде азота* / Н.Н. Малущин, В.Е. Громов, Д.А. Романов, Л.П. Бащенко, О.А. Перегудов. Новокузнецк: Полиграфист, 2022:232. EDN:JUAWCF.
3. *Износостойкие наплавки на сталь: структура, фазовый состав и свойства* / С.В. Райков, В.Е. Кормышев, В.Е. Громов, Ю.Ф. Иванов, С.В. Коновалов. Новокузнецк: Изд. центр СибГИУ, 2017:318. EDN: ZVIXED.
4. Рябцев И.А., Сенченков И.К. *Теория и практика наплавочных работ*. Киев: Эко-технологія, 2013:400.

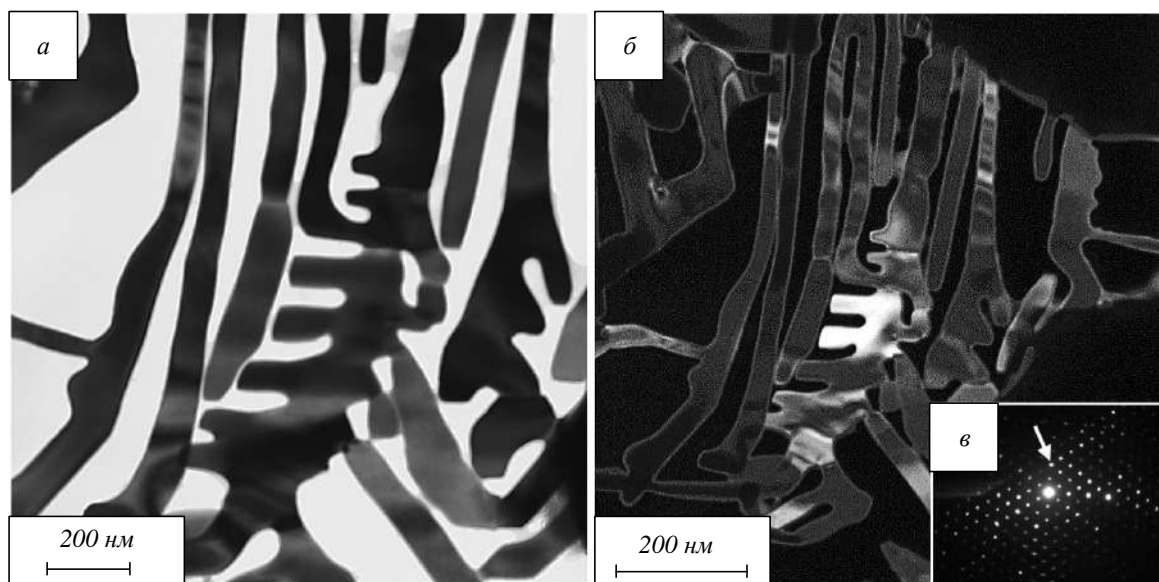


Рис. 6. Электронно-микроскопическое изображение структуры карбидного каркаса
 а – светлое поле; б – темное поле, полученное в рефлексе [004]Me₆C (Fe₃W₃C); в – микроэлектронграмма
 (стрелкой указан рефлекс, в котором получено темное поле)

Fig. 6. Electron microscopic image of the structure of the carbide framework:
 a – bright field; б – dark field obtained in the [004]Me₆C (Fe₃W₃C) reflection; в – microelectronogram
 (the arrow indicates the reflex in which the dark field was obtained)

5. Походня И.К., Шлепаков В.Н., Максимов С.Ю., Рябцев И.А. Исследования и разработки ИЭС им. Е.О. Патона в области электродуговой сварки и наплавки порошковой проволокой. *Автоматическая сварка*. 2010;(12) :34–42.
6. Вдовин К.Н., Никитенко О.А., Феоктистов Н.А., Горленко Д.А. Изучение влияния азотированного феррованадия на параметры микроструктуры литых изделий из стали Гадфильда. *Литейщик России*. 2018;(3):23–27.
7. Нефедьев С.П., Емелюшин А.Н. Влияние азота на формирование структуры и свойств плазменных покрытий типа 10P6M5. *Вестник Югорского государственного университета*. 2021;(3):33–45.
<http://dx.doi.org/10.17816/byusu20210233-45>. EDN: XEXXML
8. Кутепов С.Н., Калинин А.А., Гвоздев А.Е. Современные стали для быстрорежущей обработки металлических сплавов. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2018;(10):597–607. EDN: YRBJHN.
9. Rakhadilov B.K., Wieleba W., Kylyshkanov M.K., Kenesbekov A.B., Maulet M. Structure

Т а б л и ц а 4

Результаты анализа элементного состава объема зерна α-фазы
 Table 4. Results of analysis of the elemental composition of the α-phase grain volume

Спектр	Содержание элемента, % (по массе)						
	C	Al	V	Cr	Mn	Fe	W
1	0,22	0,15	0,35	1,94	0,19	24,69	72,91
2	1,23	0,30	1,98	3,74	0,29	41,69	50,77
3	0,52	0,04	0,98	3,24	0,09	42,61	51,31

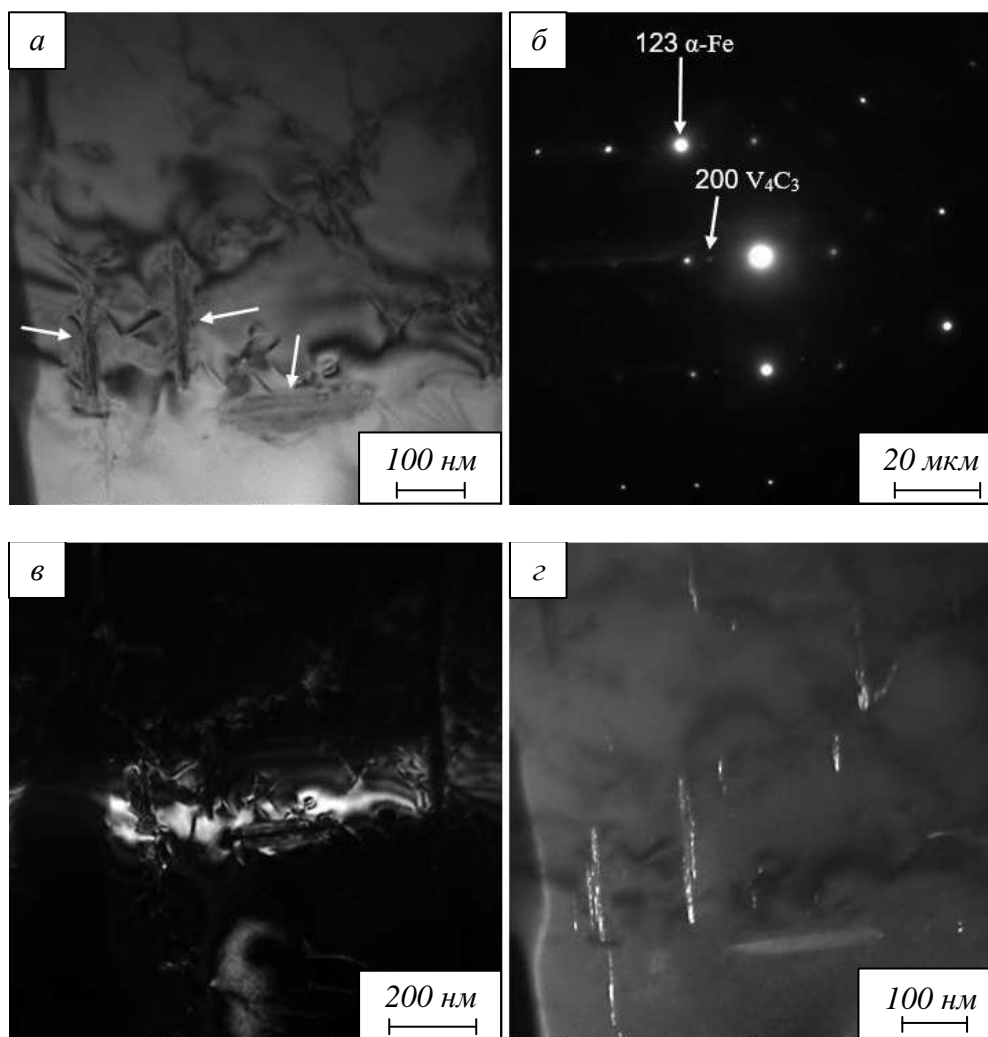


Рис. 7. Электронно-микроскопическое изображение структуры зерна α -фазы:
 а – светлое поле; б – микроэлектроннограмма; в, з – темное поле, полученное в рефлексах [123] α -Fe и [004] V_4C_3 (стрелками указано на поз. а – частицы карбидной фазы; на поз. б – рефлексы, в которых получено темное поле)
 Fig. 7. Electron microscopic image of the grain structure of the α -phase:
 а – a light field; б – a microelectronogram; в, з – a dark field obtained in reflexes [123] α -Fe and [004] V_4C_3 (arrows indicated in pos. а – particles of the carbide phase; in pos. б – reflexes in which a dark field is obtained)

and phase composition of high-speed steels. *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series.* 2020;2(98):83–92.

<https://doi.org/10.31489/2020Ph2/83-92>.

EDN: ZHOEOP.

10. Киреев В.П. Упрочнение быстрорежущей стали динамическим микролегированием и его влияние на износостойкость режущего инструмента. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* 2015;17:6(2):414–418. EDN: WDCVAB.
11. Rakhadilov B.K., Zhureroва L.G., Scheffler M., Khassenov A.K. Change in high temperature wear resistance of high speed steel by plasma nitriding. *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series.* 2018;3(91):59–65. EDN: KJWHYN.
12. Ouyang Q., Luo P., Zhang F., He Q., Wang Y., Li S. Analyzing the effect of CeB6 on microstructure and mechanical properties of high-

speed steel consolidated by powder metallurgy. *Journal of Materials Engineering and Performance.* 2018;27(5):5973–5983.

<https://doi.org/10.1007/s11665-018-3675-1>

13. Ding C.-C., Zhao M.-D., Li Z.-D., Cao Y.-G. Effect of quenching temperature on microstructure and properties of high-speed axle steel. *Transactions of Materials and Heat Treatment.* 2018;39(12):49–56. <http://dx.doi.org/10.13289/j.issn.1009-6264.2018-0311>
14. Rahman N.U., Capuano L., Meer A., Rooij M., Matthews D.T.A., Walmag G., Sinnaeve M., García-Junceda A., Castillo M., Römer G.R.B.E. Development and characterization of multilayer laser cladded high speed steels. *Additive Manufacturing.* 2018;24:76–85. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.09.009>
15. Matlygin G., Savilov A., Nikolaev A., Timofeev S. Investigation of form deviations of

- high-speed steel (HSS) products under turning-milling operation using automatically programmed tools. *Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2023;15–23. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-7-15-23>
16. Petrova L., Sergeeva A., Vdovin V. Modification of a high-speed cutting tool surface by combined tungsten steel and nitrogen saturation. *Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2023;24–32. <http://dx.doi.org/10.30987/2223-4608-2023-7-24-32>
 17. Egerton F.R. *Physical principles of electron microscopy*. Basel: Springer International Publishing, 2016:196.
 18. Kumar C.S.S.R. *Transmission electron microscopy. Characterization of nanomaterials*. New York: Springer, 2014:717. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-38934-4>
 19. Carter C.B., Williams D.B. eds. *Transmission electron microscopy*. Berlin: Springer International Publishing, 2016:518.
 20. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Konovalov S.V., Kormyshev V.E., Aksenova K., Teresov A. Structure and properties of strengthening layer on Hardox 450 steel. *Materials Science and Technology*. 2017;33(17):2040–2045. <https://doi.org/10.1134/S003602952203003X>
 21. Konovalov S.V., Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kapralov E.V. Phase composition and defect substructure of double surfacing, formed with V-Cr-Nb-W powder wire on steel. *Inorganic materials: Applied research*. 2017;8(2):313–317. <https://doi.org/10.1134/S2075113317020101>
 22. Konovalov S.V., Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kapralov E.V. Gradient structure generated in Hardox 450 Steel with built-up layer. *Inorganic materials: Applied research*. 2018;9(3):427–432. <https://doi.org/10.1134/S2075113318030164>
- REFERENCES**
1. Malushin N.N., Valuev D.V., Osetkovskii V.L., Solodskii S.A. *Technologies for surfacing parts of the mining and metallurgical complex with high-hardness steels*. Tomsk: Izd-vo TPU, 2015:212. (In Russ.).
 2. Malushin N.N., Gromov V.E., Romanov D.A., Bashchenko L.P., Peregudov O.A. *Hardening of heat-resistant alloys by plasma in nitrogen medium*. Novokuznetsk: Poligrafist, 2022:232. (In Russ.). EDN:JUAWCF.
 3. Raikov S.V., Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Konovalov S.V. *Wear-resistant surfacing on steel: structure, phase composition and properties*. Novokuznetsk: ITs SibGIU, 2017:318. (In Russ.).
 4. Ryabtsev I.A., Senchenkov I.K. *Theory and practice of surfacing works*. Kyiv: Ekotekhnologiya, 2013:400. (In Russ.).
 5. Pokhodnya I.K., Shlepakov V.N., Maksimov S.Yu., Ryabtsev I.A. Research and development of the E.O. Paton thermal power plant in the field of electric arc welding and surfacing with powder wire. *Avtomaticheskaya svarka*. 2010;(12) :34–42. (In Russ.).
 6. Vdovin K.N., Nikitenko O.A., Feoktistov N.A., Gorlenko D.A. Study of the effect of nitrated ferrovandium on the microstructure parameters of cast Gadfield steel products. *Liteishchik Rossii*. 2018;(3):23–27. (In Russ.).
 7. Nefed'ev S.P., Emelyushin A.N. Plasma-powder surfacing of nitrogen – containing wear – resistant coatings. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2021;(3):33–45. (In Russ.).
 8. Kutepov S.N., Kalinin A.A., Gvozdev A.E. Modern steels for high-speed processing of metal alloys. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2018;(10):597–607. (In Russ.). EDN: JUAWCF.
 9. Rakhadilov B.K., Wieleba W., Kylyshkanov M.K., Kenesbekov A.B., Maulet M. Structure and phase composition of high - speed steels. *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series*. 2020;2(98):83–92. <https://doi.org/10.31489/2020Ph2/83-92>. EDN: ZHOEOP.
 10. Kireev V.P. Hardening of high-speed steel by dynamic microalloying and its effect on the wear resistance of cutting tools. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2015;17(6(2)):414–418. (In Russ.). EDN: WDCVAB.
 11. Rakhadilov B.K., Zhurerova L.G., Scheffler M., Khassenov A.K. Change in high temperature wear resistance of high speed steel by plasma nitriding. *Bulletin of the Karaganda University. Physics Series*. 2018;3(91):59–65. EDN: KJWHYN.
 12. Ouyang Q., Luo P., Zhang F., He Q., Wang Y., Li S. Analyzing the effect of CeB6 on microstructure and mechanical properties of high-speed steel consolidated by powder metallurgy. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2018;27(5):5973–5983. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3675-1>
 13. Ding C.-C., Zhao M.-D., Li Z.-D., Cao Y.-G. Effect of quenching temperature on microstructure and properties of high-speed axle steel. *Transactions of Materials and Heat Treatment*. 2018;39(12):49–56.

<http://dx.doi.org/10.13289/j.issn.1009-6264.2018-0311>

14. Rahman N.U., Capuano L., Meer A., Rooij M., Matthews D.T.A., Walmag G., Sinnaeve M., García-Junceda A., Castillo M., Römer G.R.B.E. Development and characterization of multilayer laser clad high speed steels. *Additive Manufacturing*. 2018;24:76–85. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.09.009>
15. Matlygin G., Saviolov A., Nikolaev A., Timofeev S. Investigation of form deviations of high-speed steel (HSS) products under turning-milling operation using automatically programmed tools. *Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2023;15–23. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2023-7-15-23>
16. Petrova L., Sergeeva A., Vdovin V. Modification of a high-speed cutting tool surface by combined tungsten steel and nitrogen saturation. *Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2023;24–32. <http://dx.doi.org/10.30987/2223-4608-2023-7-24-32>
17. Egerton F.R. *Physical principles of electron microscopy*. Basel: Springer International Publishing, 2016:196.
18. Kumar C.S.S.R. *Transmission electron microscopy. Characterization of nanomaterials*. New York: Springer, 2014:717. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-38934-4>
19. Carter C.B., Williams D.B. eds. *Transmission electron microscopy*. Berlin: Springer International Publishing, 2016:518.
20. Ivanov Yu.F., Gromov V.E., Konovalov S.V., Kormyshev V.E., Aksenova K., Teresov A. Structure and properties of strengthening layer on Hardox 450 steel. *Materials Science and Technology*. 2017;33(17):2040–2045. <https://doi.org/10.1134/S003602952203003X>
21. Konovalov S.V., Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kapralov E.V. Phase composition and defect substructure of double surfacing, formed with V-Cr-Nb-W powder wire on steel. *Inorganic materials: Applied research*. 2017;8(2):313–317. <https://doi.org/10.1134/S2075113317020101>
22. Konovalov S.V., Kormyshev V.E., Gromov V.E., Ivanov Yu.F., Kapralov E.V. Gradient structure generated in Hardox 450 steel with built-up layer. *Inorganic materials: Applied research*. 2018;9(3):427–432. <https://doi.org/10.1134/S2075113318030164>

Сведения об авторах

Александр Сергеевич Чапайкин, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М.

Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: tchapajkin.s@yandex.ru

Виктор Евгеньевич Громов, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-5147-5343

Пэй Чжан, доктор, профессор, Школа материаловедения и инженерии, Шанхайский совместный инновационный центр передовых лазерных производственных технологий

E-mail: peilei@sues.edu.cn

ORCID: 0000-0002-2342-5832

Юрий Федорович Иванов, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт сильноточной электроники СО РАН

E-mail: yufi55@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8022-7958

Роман Евгеньевич Крюков, д.т.н., профессор кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: rek_nzrmk@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3394-7941

Виталий Владиславович Шляр, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, научный сотрудник лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: shlyarov@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8130-648X

Александр Петрович Семин, к.т.н., старший научный сотрудник, доцент кафедры инженерных конструкций, строительных технологий и материалов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: syomin53@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3989-7420

Information about the authors:

Alexander S. Chapaikin, Postgraduate of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

E-mail: tchapajkin.s@yandex.ru

Viktor E. Gromov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru

ORCID: 0000-0002-5147-5343

Peilei Zhang, Dr., Prof. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Collaborative Innovation Center of Laser Advanced Manufacturing Technology

E-mail: peilei@sues.edu.cn

ORCID: 0000-0002-2342-5832

Yurii F. Ivanov, *Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Chief Researcher*, Institute of High Current Electronics SB RAS

E-mail: yufi55@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8022-7958

Roman E. Kryukov, *Dr. Sci.(Eng.), Professor of the Department of Ferrous Metallurgy*, Siberian State Industrial University

E-mail: rek_nzrmk@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3394-7941

Vitaly V. Shlyarov, *Postgraduate of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Researcher of Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing*, Siberian State Industrial University

E-mail: shlyarov@mail.ru

ORCID: 0000-0001-8130-648X

Alexander P. Semin, *Cand. Sci. (Eng.), senior researcher, associate professor of the department of engineering structures, construction technologies and materials*, Siberian State Industrial University

E-mail: syomin53@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3989-7420

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 06.10.2023

После доработки 01.11.2023

Принята к публикации 14.11.2023

Received 06.10.2023

Revised 01.11.2023

Accepted 14.11.2023

Оригинальная статья

УДК 621:538.911:538.951

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-47-57

**ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ И ОРГАНИЗАЦИИ СТРУКТУРЫ
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ
БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ И
МЕДИ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПРОВОЛОЧНОЙ АДДИТИВНОЙ
ТЕХНОЛОГИИ**

© 2024 г. А. В. Чумаевский, К. С. Осипович, В. М. Семенчук, С. Ю. Тарасов,
Е. А. Колубаев

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

Аннотация. Проведены исследования закономерностей организации структуры и свойств крупногабаритных деталей на основе меди и нержавеющей стали в процессе печати методом проволоочной аддитивной электронно-лучевой технологии. Была отработана на плоских тестовых образцах методика 3D-печати, которая обеспечивала получение бездефектных экспериментальных образцов с невысокой степенью взаимного перемешивания компонентов в переходной зоне. Печать проводили на экспериментальном оборудовании в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН последовательным формированием на подложке из нержавеющей стали с использованием наклонно-поворотного охлаждаемого стола стального цилиндра. Далее с предварительным прогревом стали на нее наносили медь на всю высоту цилиндра. Между нанесением филаментов на основе стали и меди механической обработки стального цилиндра не проводили. По данным структурных исследований в образцах происходит формирование достаточно плотного контакта меди и стали, что свидетельствует о полном заполнении медью всех неровностей, находившихся на стальном цилиндре после печати. В стальных участках биметаллических элементов сохраняется дендритное строение, в медных – структура является зеренной. Ориентация зерен или дендритов в компонентах образца связана с локальными особенностями процесса печати и направлением отвода тепла. Это связанные с геометрией зоны печати при формировании биметаллических образцов, приводящие к качественным различиям в структуре, изменяющейся от мелкозернистой равноосной до крупнозернистой столбчатой. Механические свойства медного и стального фрагментов в исследованных образцах находится на достаточно высоком уровне, прочностные показатели градиентной зоны имеют промежуточные значения.

Ключевые слова: электронно-лучевая аддитивная технология, подача двух проволок в ванну расплава, функционально-градиентный материал, механические свойства, биметаллические изделия

Благодарности. Исследования проводились с использованием оборудования Центра коллективного пользования ИФПМ СО РАН «НАНОТЕХ».

Финансирование. Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 22-19-00578, <https://rscf.ru/project/22-19-00578/>.

Для цитирования: Чумаевский А.В., Осипович К.С., Семенчук В.М., Тарасов С.Ю., Колубаев Е.А. Особенности получения и организации структуры крупногабаритных функционально-градиентных биметаллических элементов на основе нержавеющей стали и меди методом электронно-лучевой проволоочной аддитивной технологии. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):47–57. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(47\)-47-57](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(47)-47-57)

Original article

PECULIARITIES OF OBTAINING AND ORGANISING THE STRUCTURE OF LARGE-SIZE FUNCTIONAL-GRADIENT BIMETALLIC ELEMENTS BASED ON STAINLESS STEEL AND COPPER BY WIRE-FEED ELECTRON BEAM ADDITIVE MANUFACTURING

© 2024 A. V. Chumaevskii, K. S. Osipovich, V. M. Senemchuk, S. Yu. Tarasov, E. A. Kolubaev

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

Abstract. Studies of the patterns of organization of the structure and properties of large-sized parts based on copper and stainless steel in the printing process by wire additive electron beam technology have been carried out. A 3D printing technique was developed on flat test samples, which ensured the production of defect-free experimental samples with a low degree of mutual mixing of components in the transition zone. Printing was carried out on experimental equipment at the Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS by sequential formation on a stainless steel substrate using an inclined-rotary cooled table of a steel cylinder. Then, with preheating of the steel, copper was applied to it to the entire height of the cylinder. No mechanical treatment of the steel cylinder was carried out between the application of filaments based on steel and copper. According to structural studies, a sufficiently dense contact of copper and steel is formed in the samples, which indicates that all irregularities on the steel cylinder after printing are completely filled with copper. In steel sections of bimetallic elements, the dendritic structure is preserved, in copper sections the structure is granular. The orientation of grains or dendrites in the sample components is related to the local features of the printing process and the direction of heat dissipation. These are related to the geometry of the printing zone during the formation of bimetallic samples, leading to qualitative differences in the structure, varying from fine-grained equiaxed to coarse-grained columnar. The mechanical properties of the copper and steel fragments in the studied samples are at a fairly high level, the strength parameters of the gradient zone have intermediate values.

Keywords: electron beam additive manufacturing, dual wire-feed technology, functional graded material, mechanical properties, bimetallic components

Acknowledgements. The studies were carried out using the equipment of the NANOTECH Shared-use Center of ISPMS SB RAS.

Funding. The work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-19-00578, <https://rscf.ru/project/22-19-00578/>.

For citation: Chumaevskii A.V., Osipovich K.S., Semenchuk V.M., Tarasov S.Y., Kolubaev E.A. Peculiarities of obtaining and organising the structure of large-size functional-gradient bimetallic elements based on stainless steel and copper by wire-feed electron beam additive manufacturing. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):47–57. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(47\)-47-57](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(47)-47-57)

Введение

Современные технологии аддитивного производства применяются для получения изделий из различных металлов и сплавов [1]. Их применение позволяет изготавливать детали в широком диапазоне форм и размеров [2]. Использование различных способов аддитивного производства позволяет получать детали с неоднородной, сложной и градиентной структурой с изначально заданным распределением компонентов в объеме изделия [3; 4]. При использова-

нии современных технологий высокопроизводительного аддитивного электронно-лучевого производства [5] возможно не только управление геометрией получаемых изделий, но и формирование в отдельных их частях необходимых эксплуатационных характеристик. Так как применение электронно-пучковых технологий для обработки изделий из различных металлов и сплавов достаточно хорошо изучено [6], рассматриваемый метод позволяет формировать детали с прогнозируемыми свойствами. Приме-

нение различных способов управления структурой при печати позволяет формировать в изделиях как композитную структуру, так и упрочненные или модифицированные сплавы [7; 8]. Получение функционально-градиентных материалов и деталей [9; 10] различными по физической природе аддитивными методами в последние годы набирает интенсивность в мировой литературе. Возможность соединения в одном изделии свойств двух принципиально различающихся по своим характеристикам материалов [11] дает неоспоримые преимущества в сравнении с традиционными технологиями. По этой причине все большее количество работ появляется по созданию функционально-градиентных материалов и изделий методами аддитивных технологий [12].

В основе высокопроизводительных проволочных технологий получения изделий с функционально-градиентной структурой лежит принцип поочередной или одновременной подачи в ванну расплава двух или более филаментов различных металлов или сплавов [13; 14]. Соответственно в процессе печати возможно формирование как плавного, так и резкого перехода между компонентами изделия [15; 16]. Такое положение позволяет использовать проволочную аддитивную электронно-лучевую и электродуговую технологии на производстве для широкого спектра возможных изделий.

В настоящее время одними из наиболее интересных в промышленном применении биметаллических изделий являются емкости и резервуары с внутренним объемом из нержавеющей стали и медной поверхностью. Это необходимо, например, для отвода тепла от емкостей и аппаратов химической промышленности или для оборудования криогенной техники. Нержавеющая сталь может обеспечивать высокие механические свойства и коррозионную стойкость при повышенных и пониженных температурах, а медь – интенсивность теплопередачи от изделия. Одной из наиболее подходящих технологий для изготовления изделий такого типа при этом является проволочная электронно-лучевая 3D-печать [17]. При ее использовании возможно формирование деталей с функционально-градиентной структурой за один технологический цикл, что обеспечивает дополнительную экономию как ресурсов, так и временных затрат при производстве [18]. В настоящее время практически отсутствует информация о получении крупногабаритных изделий на основе меди и стали рассматриваемым методом [19; 20]. По этой причине настоящая работа направлена на получение биметаллического цилиндра на основе меди и стали с использованием проволочной аддитивной электронно-лучевой технологии.

Материалы и методы исследования

В настоящей работе были получены изначально плоские, а затем цилиндрические образцы по схеме, представленной на рис. 1. Предварительный образец 1 получали поэтапным нанесением на подложку двух вертикальных стенок из стали марки 06X19H9T и меди марки М1 за счет плавления подаваемой через сопло 3 проволоки 4 электронным пучком 5. Формирование пучка проводили в электронной пушке 6 и его вводили в зону печати через систему магнитной фокусировки 7 с образованием ванны расплава 8. Проволоку подавали от источника 9. Печать изначально стальной части, а после медной проводили по причине слишком избыточного перемещения компонентов в переходной зоне при одновременной печати двух стенок, что было выяснено в ранее проведенных работах. Диаметр проволоки составлял 1,6 мм; ускоряющее напряжение при печати – 30 кВ; ток пучка варьировался в пределах 40 – 80 мА, с большими значениями при печати медной части.

Образец биметаллического цилиндра получали при аналогичных параметрах процесса, но с использованием наклонно-поворотного стола 12 (рис. 1, б). Стальную часть 10 биметалла получали толщиной в два слоя (примерно 12 – 14 мм), после чего в один слой (6 – 7 мм) наносили медную часть 11. Скорость вращения 13 подбирали аналогичной к использованной для предварительных образцов скорости линейного перемещения. Изначально был получен стальной цилиндр (рис. 1, в), далее проводили печать медного фрагмента (рис. 1, г) и получали биметаллический элемент (рис. 1, д), а после этого проводили токарную обработку изделия с получением готового образца (рис. 1, е).

В качестве подложки при получении образцов использовали сталь марки 12X18H10T. Толщина подложки при печати плоских образцов составляла 5 мм, цилиндрические образцы по причине большей массы и габаритов получали на подложках толщиной 20 мм. Размер плоских образцов составлял 120 × 60 мм при толщине 12 – 14 мм. Стальной цилиндр имел толщину 12 – 14 мм, диаметр и высоту 100 мм.

После изготовления экспериментальных образцов из них вырезали металлографические шлифы и лопатки для механических испытаний на электроэрозионном станке DK7750. Лопатки вырезали с размером рабочей части 12 × 2,7 × 2,7 мм из медной и стальной частей образца, а также из зоны структурного градиента. Металлографические шлифы вырезали из образцов перпендикулярно направлению печати. После осуществляли их шлифовку, полировку и травление. Анализ структуры выполняли с использо-

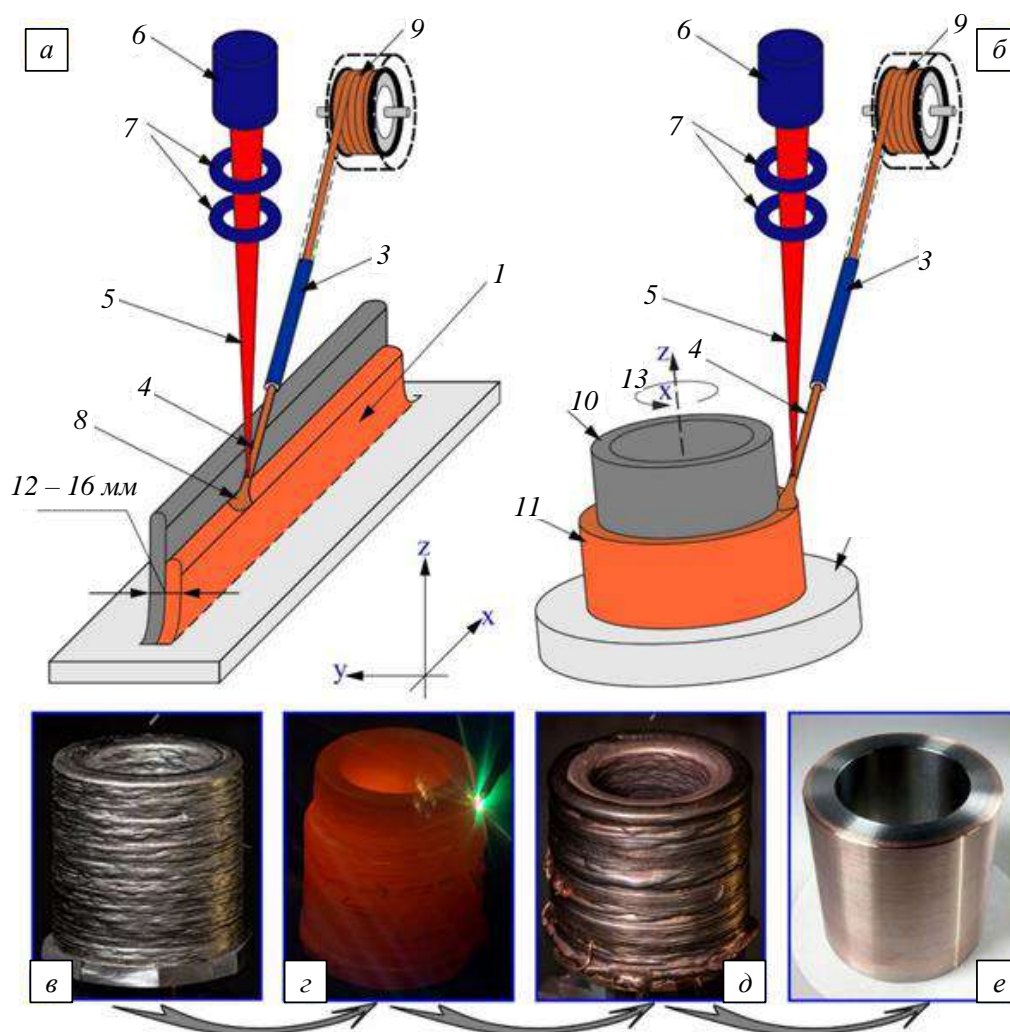


Рис. 1. Схема процесса печати плоского (а) и цилиндрического (б) биметаллических образцов, внешний вид стального цилиндра (в), процесса печати (з), полученного биметаллического образца до (д) и после (е) механической обработки:

1 – образец; 2 – подложка; 3 и 4 – подаваемая проволока и сопло; 5 – электронный пучок; 6 – электронная пушка;

7 – система фокусировки; 8 – ванна расплава; 9 – проволокоподатчик; 10 – стальная часть цилиндра;

11 – медная часть цилиндра; 12 – цилиндрическая подложка; 13 – ось печати и направление вращения

Fig. 1. Scheme of printing process of flat (a) and cylindrical (b) bimetallic samples, appearance of steel cylinder (в), printing process (z), obtained bimetallic sample before (d) and after (e) mechanical processing:

1 – sample; 2 – substrate; 3 and 4 – fed wire and nozzle; 5 – electron beam; 6 – electron gun; 7 – focusing system; 8 – melt bath;

9 – wire feeder; 10 – steel part of cylinder; 11 – copper part of cylinder; 12 – cylindrical substrate;

13 – printing axis and direction of rotation

ванием оптической (Altami MET 1С) и лазерной сканирующей (Olympus LEXT 4100) микроскопии. Механические испытания проводили на установке УТС110М.

Результаты и их обсуждение

В процессе печати предварительных образцов формировалась однородная и бездефектная структура как основных компонентов, так и градиентной зоны между ними (рис. 2). Для стального фрагмента характерна дендритная структура, а для медного – зеренная. Рост дендритов в стальной части происходил в основном в вертикальном направлении (1 на рис. 2, а, б) или под небольшим углом к нему сходящимися к верхней части наклонными линиями, начинающимися от

краев стенки (2 на рис. 2, а, б). Это обусловлено теплоотводом при печати и геометрией наносимых слоев.

Формирование структуры в медном фрагменте происходит преимущественно в направлении отвода тепла. Так как при нанесении меди тепло отводится также и в стальной участок образца, рост зерен происходит под углом к вертикальной оси (3 на рис. 2, а, в). Градиентная зона в основном является достаточно тонкой, переход от стали к меди является резким (рис. 2, д – жс). В областях по высоте соответствующих центральной части нанесенных слоев граница между компонентами является резкой (рис. 2, е), а в межслойных частях за счет изна-

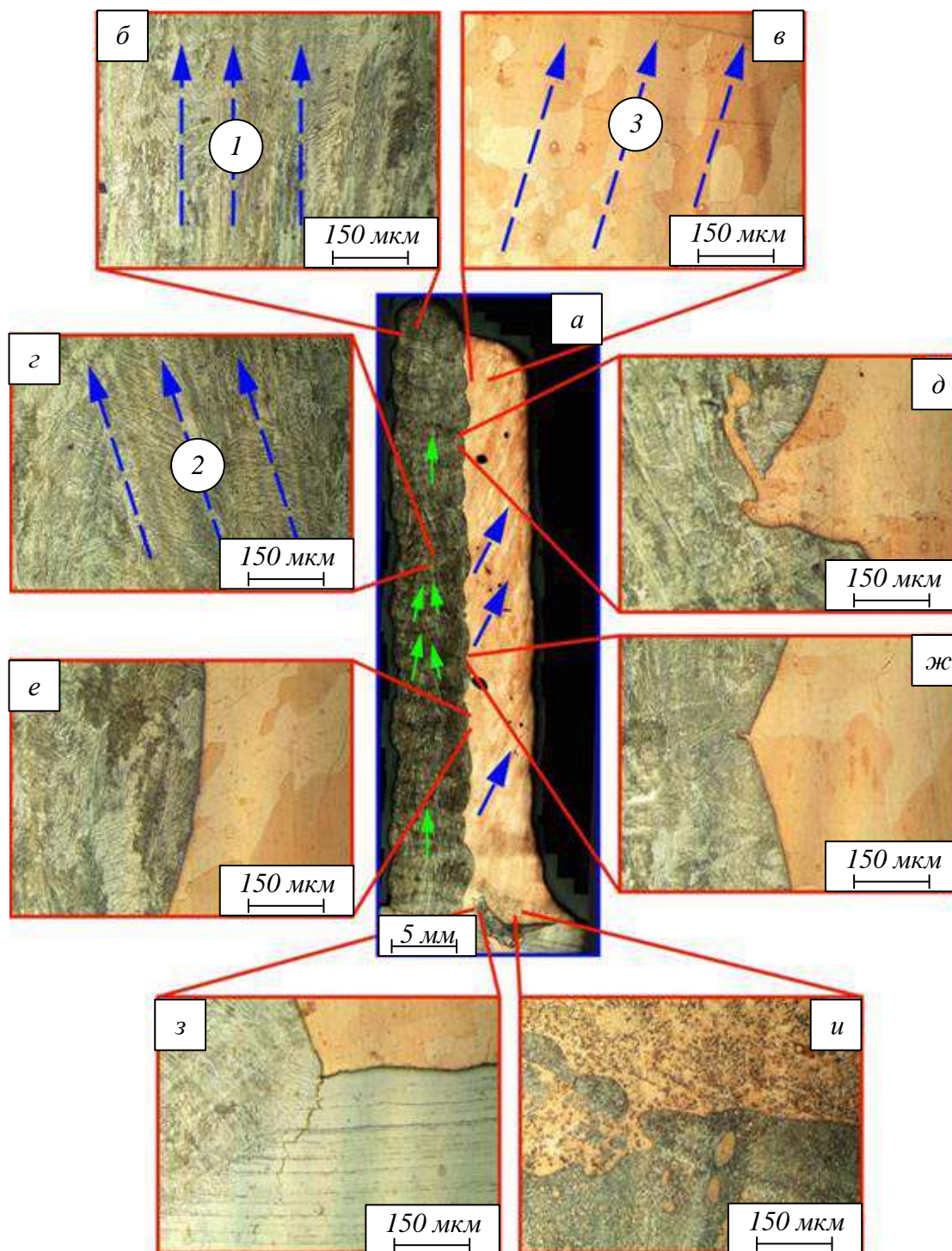


Рис. 2. Формирование структуры биметаллического элемента на основе стали и меди (а), структура в верхней (б, в), центральной (г – ж) и нижней (з, и) частях фрагментов:

1 – рост стали в вертикальном направлении; 2 – рост дендритов под углом к оси выращивания;

3 – рост зерен меди под углом к оси выращивания образца

Fig. 2. Formation of the structure of a bimetallic element based on steel and copper (a), structure in the upper (б, в), central (г – ж) and lower (з, и) parts of the fragments:

1 – growth of steel in the vertical direction; 2 – growth of dendrites at an angle to the vertical axis;

3 – growth of copper grains at an angle to the sample vertical axis

чальных неровностей происходит некоторое углубление меди в сталь (рис. 2, д, ж).

Вблизи подложки из-за значительных термических напряжений и ее оплавления первыми из наносимых слоев происходит образование трещин (рис. 2, з) и механически перемешанных

слоев (рис. 2, и). Формирование таких дефектов при печати меди или медных сплавов происходило и в ранее проведенных исследованиях [3]. В большинстве случаев это обуславливает необходимость удаления материала на расстоянии 5 – 6 мм от подложки, что требуется учиты-

вать при проектировании образцов и процесса их получения проволочным электронно-лучевым методом.

Формирование структуры в биметаллических цилиндрах происходит аналогично плоским образцам, но с рядом изменений, обусловленных в основном отличиями в геометрии образцов (рис. 3). В стальной части изделия выделяется также два – три направления роста (2, 3, 4 на рис. 3, а, в, г, ж, з), два из которых направлены под углом к вертикальной оси, а одно вертикально. В нижней части образцов также отмечается некоторое внедрение материала, замешанного от подложки (рис. 3, б). Структура медной части образцов при этом характеризуется достаточно значительными изменениями в сравнении с плоскими образцами. Общее строение рассматриваемых фрагментов является макроскопически неоднородным, хотя и выделяется наличие участков со структурой из вытянутых столбчатых зерен, ориентированных под углом к вертикальной оси (1, 8 на рис. 3, н). В ряде участков формируется мелкозернистая структура с равноосными зернами (6 на рис. 3, д, е, и, л), которая в стандартных условиях формируется только на границе получаемого образца и подложки. Часть участков медного фрагмента имеют структуру с достаточно крупными зернами, но формой близкой к равноосной (7 на рис. 3, д, м). Несмотря на такую неоднородность в структуре, дефектов в медной части цилиндра не выявлено. Переходная зона между фрагментами является достаточно тонкой, хотя ее величина все-таки больше, чем в плоском образце (от 50 до 100 мкм). Неравномерность проплавления поверхности стального цилиндра при печати на его поверхности медного фрагмента обуславливала неоднородности перемешивания меди и стали в градиентной зоне. Это в свою очередь могло привести к неравномерному процессу образования структуры во всей медной части образца с чередованием участков с мелкодисперсной, крупнозернистой структурой, а также со столбчатыми зернами.

Механические свойства полученных биметаллических элементов, определенные в испытаниях на растяжение в направлении оси выращивания, находятся на достаточном и приемлемом уровне (рис. 4). Для медной части образцов характерны предел прочности до 175 – 180 МПа

и предела текучести до 75 – 80 МПа. Для стали марки 06Х19Н9Т предел текучести в среднем составляет 260 – 265 МПа, а предел прочности – 625 – 630 МПа. Такие характеристики свойственны рассматриваемым материалам после литья. Прочностные свойства переходной зоны занимают промежуточные значения. Пластичность образцов на всех участках находится на достаточно высоком уровне.

Выводы

Проведенные исследования показывают, что методом проволочной аддитивной электронно-лучевой технологии возможно формирование крупногабаритных изделий с наличием функционального градиента и удовлетворительными гарантированными прочностными характеристиками. Достаточно однородная и бездефектная структура переходной зоны между компонентами образца характеризуется высокими механическими свойствами, находящимися на промежуточном уровне между свойствами медного и стального фрагментами. Формирование структуры как медного, так и стального участков биметаллических элементов получаем в тесной связи с условиями теплоотвода в них. Структура стали формировалась с преимущественным ростом дендритов в направлении оси выращивания или под небольшим углом к ней. Для плоского образца основным направлением роста зерен в меди была результирующая между вертикальной и горизонтальной осями, так как отвод тепла происходил при печати в стальной фрагмент. В цилиндрическом образце в меди на различных участках формировалась аналогичная структура, но для достаточно большого количества зон образца структура имела относительно равноосное крупно- или мелкозернистое состояние. Такое положение может быть обусловлено неоднородностью нанесения меди с частичным оплавлением пучком стального фрагмента с волнистой поверхностью. В таком случае, где происходило частичное смешивание стали и меди образовывалась мелкодисперсная структура, а где происходило более стабильное ее нанесение образовывались столбчатые вытянутые зерна. Устранение обозначенного эффекта возможно за счет проведения предварительной обработки стального фрагмента после его печати до нанесения на него меди.

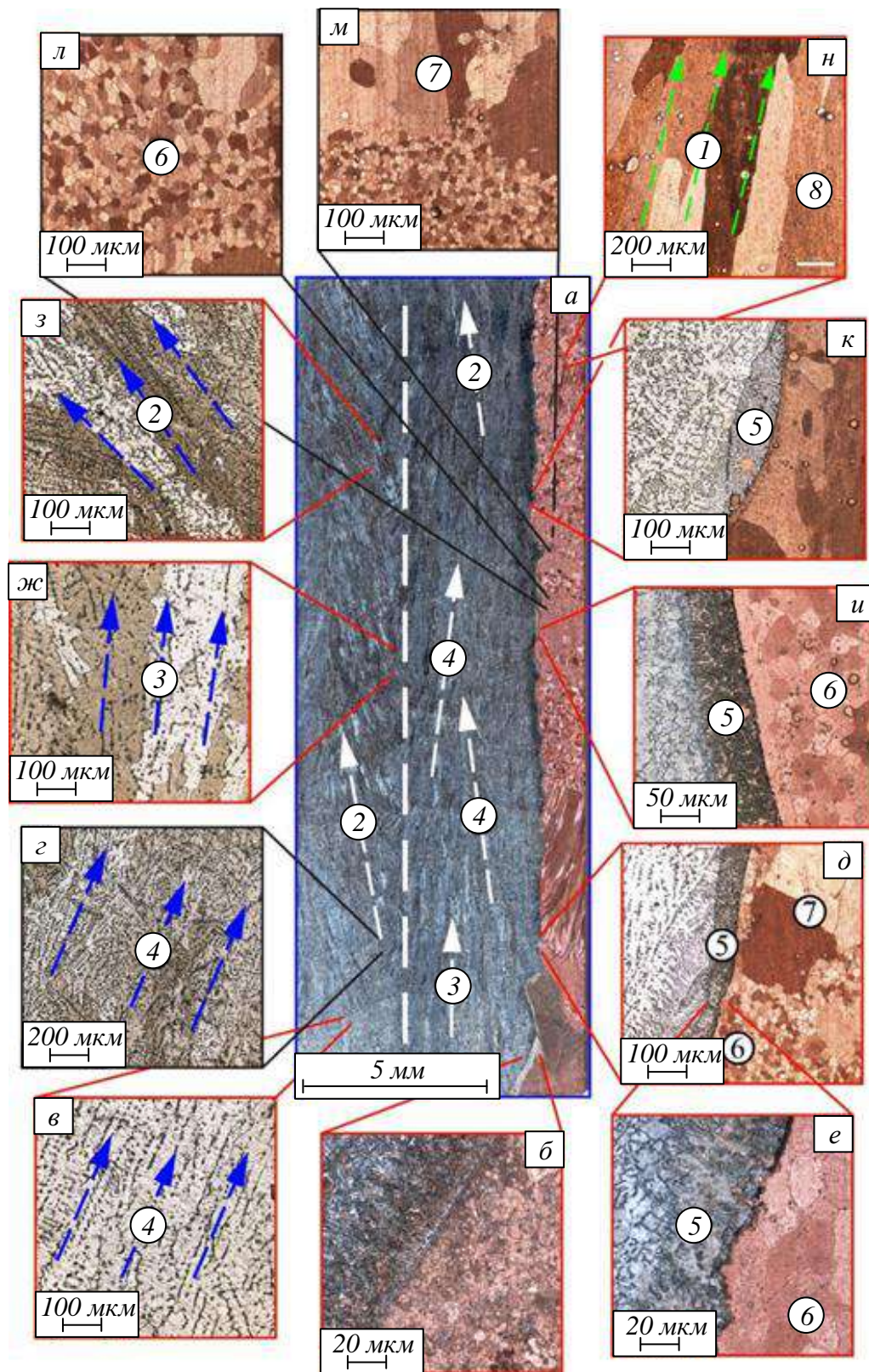


Рис. 3. Формирование структуры биметаллического цилиндра после печати:

1 – рост медных зерен под углом к вертикальной оси; 2, 4 – рост стальных дендритов под углом к вертикальной оси; 3 – рост дендритов стали в вертикальном направлении; 5 – градиентная зона на основе стали; 6 – мелкодисперсная равноосная зеренная структура меди; 7 – крупнозернистая структура меди; 8 – вытянутые столбчатые зерна меди

Fig. 3. Formation of the bimetallic cylinder structure after printing:

1 – growth of copper grains at an angle to the vertical axis; 2, 4 – growth of steel dendrites at an angle to the vertical axis; 3 – growth of steel dendrites in the vertical direction; 5 – gradient zone; 6 – equiaxed grain copper structure; 7 – coarse-grained copper structure; 8 – columnar copper grains

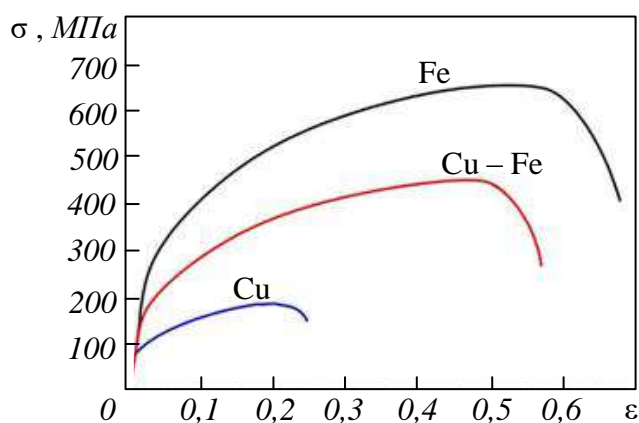


Рис. 4. Диаграмма напряжение – деформация образцов, вырезанных из стальной, медной частей образца и переходной зоны
Fig. 4. Stress-strain diagrams of specimens cut from steel, copper parts of the specimen and transition zone

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ван Я., Коновалов С.В., Чэн С., Панченко И.А., Коток М.М. Исследование влияния термической обработки на сплавы системы Cu – Al, полученные проволочно-дуговым аддитивным способом. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;1(43):89–97.
[http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-89-97](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-89-97)
2. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S. Mukherjee, T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2018;92:112–224.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
3. Zhang X., Pan T., Flood A., Chen Y., Zhang Y., Liou F. Investigation of Copper/Stainless Steel Multi-Metallic Materials Fabricated by Laser Metal Deposition. *Materials Science & Engineering A*. 2021;811:141071.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
4. Tan C., Zhou K., Ma W., Min L. Interfacial characteristic and mechanical performance of maraging steel-copper functional bimetal produced by selective laser melting based hybrid manufacture. *Materials and Design*. 2018;155:77–85.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.064>
5. Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Chumaevsky A.V., Astafurova E.G. Micro-, Meso- and Macrostructural Design of Bulk Metallic and Polymetallic Materials by Wire-Feed Electron-Beam Additive Manufacturing. *Physical Mesomechanics*. 2022;25(6):479–491.
<http://dx.doi.org/10.1134/S1029959922060017>
6. Гэн Я., Панченко И.А., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Чен С. Влияние электронно-пучковой обработки на структуру аддитивного сплава Al – Mg. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;2(44):13–19.
[http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-13-19](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-13-19)
7. Astafurova E.A., Astafurov S.V., Reunova K.A., Melnikov E.V., Moskvina V.A., Panchenko M.Yu., Maier G.G., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Structure Formation in Vanadium-Alloyed Chromium-Manganese Steel with a High Concentration of Interstitial Atoms C + N = 1.9 wt % during Electron-Beam Additive Manufacturing. *Physical Mesomechanics*. 2022;25(1):1–11.
<http://dx.doi.org/10.1134/S1029959922010015>
8. Su Y., Chen B., Tan C., Song X., Feng J. Influence of composition gradient variation on the microstructure and mechanical properties of 316L/Inconel718 functionally graded material fabricated by laser additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;283:116702.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116702>
9. Niendorf T., Leuders S., Riemer A., Brenne F., Tröster T., Albert Richard H., Schwarze D. Functionally Graded Alloys Obtained by Additive Manufacturing. *Advanced engineering materials*. 2014;16:857–861.
<https://doi.org/10.1002/adem.201300579>
10. Sun Z., Chueh Y.-H., Li L. Multiphase mesoscopic simulation of multiple and functionally gradient materials laser powder bed fusion additive manufacturing processes. *Additive Manufacturing*. 2020;35:101448.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2020.101448>
11. Ghanavati R., Naffakh-Moosavy H. Additive manufacturing of functionally graded metallic materials: A review of experimental and numerical studies. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;13:1628–1664.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.022>

12. Muller P., Hascoet J.-Y., Mognol P. Toolpaths for additive manufacturing of functionally graded materials (FGM) parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2014;20(6):511–522. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0011>
13. Utyaganova V., Filippov A., Tarasov S., Shamarin N., Gurianov D., Vorontsov A., Chumaevskii A., Fortuna S., Savchenko N., Rubtsov V., Kolubaev E. Characterization of AA7075/AA5356 gradient transition zone in an electron beam wire-feed additive manufactured sample. *Materials Characterization*. 2021;172:110867. EDN: NRLOVJ; <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110867>
14. Shen C., Hua X., Reid M., Liss K.-D., Mou G., Pan Z., Huang Y., Li H. Thermal Induced Phase Evolution of Fe–Fe₃Ni Functionally Graded Material Fabricated Using the Wire-Arc Additive Manufacturing Process: An in-Situ Neutron Diffraction Study. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;826(5):154097. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154097>
15. Mohan Kumar S., Rajesh Kannan A., Pravin Kumar N., Pramod R., Siva Shanmugam N., Vishnu A.S., Channabasavanna S.G. Microstructural Features and Mechanical Integrity of Wire Arc Additive Manufactured SS321/Inconel 625 Functionally Gradient Material. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021;30:5692–5703. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05617-3>
16. Chandrasekaran S., Hari S., Amirthalingam M. Wire Arc Additive Manufacturing of Functionally Graded Material for Marine Risers. *Materials Science and Engineering A*. 2020;792:139530. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2020.139530>
17. Osipovich K.S., Astafurova E.G., Chumaevskii A.V., Kalashnikov K.N., Astafurov S.V., Maier G.G., Melnikov E.V., Moskvina V.A., Panchenko M.Yu., Tarasov S.Yu., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Gradient transition zone structure in “steel – copper” sample produced by double wire-feed electron beam additive manufacturing. *Journal of Materials Science*. 2020;55:9258–9272. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04549-y>
18. Osipovich K.S., Chumaevskii A.V., Eliseev A.A., Kalashnikov K.N., Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Astafurova E.G. Peculiarities of Structure Formation in Copper/Steel Bimetal Fabricated by Electron-Beam Additive Technology. *Russian Physics Journal*. 2019;62(8):1486–1494. EDN: QKMXZL; <https://doi.org/10.1007/s11182-019-01867-w>
19. Shu X., Chen G., Liu J., Zhang B., Feng J. Microstructure evolution of copper/steel gradient deposition prepared using electron beam freeform fabrication. *Materials Letters*. 2018;213:374–377. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2017.11.016>
20. Chen G., Shu X., Liu J., Zhang B., Feng J. Crystallographic texture and mechanical properties by electron beam freeform fabrication of copper/steel gradient composite materials. *Vacuum*. 2020;171:109009. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.109009>

REFERENCES

1. Van Ya., Konovalov S.V., Chen X., Panchenko I.A., Kotok M.M. Investigation of the effect of heat treatment on alloys of the Si – Al system obtained by the wire-arc additive method. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;1(43):89–97. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-89-97](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-89-97)
2. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2018;92:112–224. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
3. Zhang X., Pan T., Flood A., Chen Y., Zhang Y., Liou F. Investigation of Copper/Stainless Steel Multi-Metallic Materials Fabricated by Laser Metal Deposition. *Materials Science & Engineering A*. 2021;811:141071. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
4. Tan C., Zhou K., Ma W., Min L. Interfacial characteristic and mechanical performance of maraging steel-copper functional bimetal produced by selective laser melting based hybrid manufacture. *Materials and Design*. 2018;155:77–85. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2018.05.064>
5. Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Chumaevsky A.V., Astafurova E.G. Micro-, Meso- and Macrostructural Design of Bulk Metallic and Polymetallic Materials by Wire-Feed Electron-Beam Additive Manufacturing. *Physical Mechanics*. 2022;25(6):479–491. <http://dx.doi.org/10.1134/S1029959922060017>
6. Geng Ya., Panchenko I.A., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Chen X. Effect of electron beam processing on the structure and properties of the Al – Mg additive alloys. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;2(44):13–19. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-13-19](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-13-19)
7. Astafurova E.A., Astafurov S.V., Reunova K.A., Melnikov E.V., Moskvina V.A., Panchenko M.Yu., Maier G.G., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A.

- Structure Formation in Vanadium-Alloyed Chromium-Manganese Steel with a High Concentration of Interstitial Atoms C + N = 1.9 wt % during Electron-Beam Additive Manufacturing. *Physical Mesomechanics*. 2022;25(1):1–11. <http://dx.doi.org/10.1134/S1029959922010015>
8. Su Y., Chen B., Tan C., Song X., Feng J. Influence of composition gradient variation on the microstructure and mechanical properties of 316L/Inconel718 functionally graded material fabricated by laser additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;283:116702. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116702>
 9. Niendorf T., Leuders S., Riemer A., Brenne F., Tröster T., Albert Richard H., Schwarze D. Functionally Graded Alloys Obtained by Additive Manufacturing. *Advanced engineering materials*. 2014;16:857–861. <https://doi.org/10.1002/adem.201300579>
 10. Sun Z., Chueh Y.-H., Li L. Multiphase mesoscopic simulation of multiple and functionally gradient materials laser powder bed fusion additive manufacturing processes. *Additive Manufacturing*. 2020;35:101448. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2020.101448>
 11. Ghanavati R., Naffakh-Moosavy H. Additive manufacturing of functionally graded metallic materials: A review of experimental and numerical studies. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;13:1628–1664. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.022>
 12. Muller P., Hascoet J.-Y., Mognol P. Toolpaths for additive manufacturing of functionally graded materials (FGM) parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2014;20(6):511–522. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2013-0011>
 13. Utyaganova V., Filippov A., Tarasov S., Shamarin N., Gurianov D., Vorontsov A., Chumaevskii A., Fortuna S., Savchenko N., Rubtsov V., Kolubaev E. Characterization of AA7075/AA5356 gradient transition zone in an electron beam wire-feed additive manufactured sample. *Materials Characterization*. 2021;172:110867. EDN: NRLOVJ; <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110867>
 14. Shen C., Hua X., Reid M., Liss K.-D., Mou G., Pan Z., Huang Y., Li H. Thermal Induced Phase Evolution of Fe–Fe₃Ni Functionally Graded Material Fabricated Using the Wire-Arc Additive Manufacturing Process: An in-Situ Neutron Diffraction Study. *Journal of Alloys and Compounds*. 2020;826(5):154097. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154097>
 15. Mohan Kumar S., Rajesh Kannan A., Pravin Kumar N., Pramod R., Siva Shanmugam N., Vishnu A.S., Channabasavanna S.G. Microstructural Features and Mechanical Integrity of Wire Arc Additive Manufactured SS321/Inconel 625 Functionally Gradient Material. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021;30:5692–5703. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05617-3>
 16. Chandrasekaran S., Hari S., Amirhalingam M. Wire Arc Additive Manufacturing of Functionally Graded Material for Marine Risers. *Materials Science and Engineering A*. 2020;792:139530. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2020.139530>
 17. Osipovich K.S., Astafurova E.G., Chumaevskii A.V., Kalashnikov K.N., Astafurov S.V., Maier G.G., Melnikov E.V., Moskvina V.A., Panchenko M.Yu., Tarasov S.Yu., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Gradient transition zone structure in “steel – copper” sample produced by double wire-feed electron beam additive manufacturing. *Journal of Materials Science*. 2020;55:9258–9272. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04549-y>
 18. Osipovich K.S., Chumaevskii A.V., Eliseev A.A., Kalashnikov K.N., Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Astafurova E.G. Peculiarities of Structure Formation in Copper/Steel Bimetal Fabricated by Electron-Beam Additive Technology. *Russian Physics Journal*. 2019;62(8):1486–1494. EDN: QKMXZL; <https://doi.org/10.1007/s11182-019-01867-w>
 19. Shu X., Chen G., Liu J., Zhang B., Feng J. Microstructure evolution of copper/steel gradient deposition prepared using electron beam freeform fabrication. *Materials Letters*. 2018;213:374–377. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2017.11.016>
 20. Chen G., Shu X., Liu J., Zhang B., Feng J. Crystallographic texture and mechanical properties by electron beam freeform fabrication of copper/steel gradient composite materials. *Vacuum*. 2020;171:109009. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.109009>

Сведения об авторах

Андрей Валерьевич Чумаевский, д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории локальной металлургии в аддитивных технологиях, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

Email: tch7av@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1983-4385

Ксения Сергеевна Осипович, к.ф.-м.н., младший научный сотрудник лаборатории локальной металлургии в аддитивных технологиях, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

Email: osipovich_k@mail.ru

ORCID: 0000-0001-9534-775X

Вячеслав Максимович Семенчук, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории локальной металлургии в аддитивных технологиях, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

Email: svm70@ispms.tsc.ru

ORCID: 0000-0002-7215-0505

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

Email: tsy@ispms.ru

ORCID: 0000-0003-0702-7639

Евгений Александрович Колубаев, д.т.н., заведующий лабораторией локальной металлургии в аддитивных технологиях, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

Email: eak@ispms.tsc.ru

ORCID: 0000-0001-7288-3656

Information about the authors:

Andrei V. Chumavskii, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher of Local Metallurgy in Additive Technologies, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

Email: tch7av@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1983-4385

Kseniya S. Osipovich, Cand. Sci. (Phys.-math.), Junior researcher at the Laboratory of Local Metallurgy in Additive Technologies, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

Email: osipovich_k@mail.ru

ORCID: 0000-0001-9534-775X

Vyacheslav M. Senemchuk, postgraduate student, Junior researcher at the Laboratory of Local Metallurgy in Additive Technologies, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

Email: svm70@ispms.tsc.ru

ORCID: 0000-0002-7215-0505

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

Email: tsy@ispms.ru

ORCID: 0000-0003-0702-7639

Evgenii A. Kolubaev, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Local Metallurgy in Additive Technologies, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences

Email: eak@ispms.tsc.ru

ORCID: 0000-0001-7288-3656

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 27.11.2023

После доработки 05.12.2023

Принята к публикации 07.12.2023

Received 27.11.2023

Revised 05.12.2023

Accepted 07.12.2023

Оригинальная статья

УДК 621:538.911:538.951

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-58-68

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ И НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ФРИКЦИОННОЙ ПЕРЕМЕШИВАЮЩЕЙ ОБРАБОТКЕ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ПРОВОЛОЧНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ АДДИТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

© 2024 г. А. М. Черемнов, Д. А. Гурьянов, А. В. Чумаевский, А. Е. Кобзев, В. Е. Рубцов

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

Аннотация. Исследованы закономерности формирования структуры в образцах титанового сплава ВТ6св, полученных методом аддитивной электронно-лучевой проволочной технологии и подвергнутых фрикционной перемешивающей обработке. Проведенные исследования показывают, что в процессе обработки происходит интенсивное взаимодействие инструмента и материала, приводящее к значительным изменениям структуры зоны перемешивания. Взаимодействие инструмента из никелевого жаропрочного сплава и материала имеет адгезионную, механическую, термическую и диффузионную природу. Его характерные особенности определяют формирование структуры и свойств материала зоны перемешивания и, соответственно, полученных деталей. По этой причине были рассмотрены основные формируемые дефекты и неоднородности зоны перемешивания образцов в сопоставлении с процессами, происходящими в области контакта инструмента и материала. Основными изменениями в структуре титанового сплава ВТ6св после фрикционной перемешивающей обработки, обусловленными взаимодействием его с никелевым инструментом, являются формируемые области с композитной структурой с высокой локальной объемной долей интерметаллидных фаз. При обработке возможно избыточное внедрение инструмента в материал так, что в нижней части пластины происходит его контакт с подложкой. Даже незначительное углубление инструмента в подложку приводит к внедрению частиц стали в зону перемешивания за счет реализации в ней вертикального течения материала. Описанные изменения с формированием ряда неоднородностей и дефектов в структуре после обработки приводят к снижению пластичности и прочности образцов в сравнении с материалом с бездефектной структурой.

Ключевые слова: электронно-лучевая аддитивная технология, механические свойства, фрикционная перемешивающая обработка, взаимодействие инструмента и материала, титановые сплавы

Благодарность. Исследования проводились с использованием оборудования Центра коллективного пользования ИФПМ СО РАН «НАНОТЕХ».

Финансирование. Работы выполнены при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-29-20172, <https://rscf.ru/project/22-29-20172/>.

Для цитирования: Черемнов А.М., Гурьянов Д.А., Чумаевский А.В., Кобзев А.Е., Рубцов В.Е. Закономерности образования дефектов и неоднородностей структуры при фрикционной перемешивающей обработке изделий из титанового сплава, полученных методом проволочной электронно-лучевой аддитивной технологии. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):58–68. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-58-68](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-58-68)

Original article

**REGULARITIES OF DEFECTS AND STRUCTURAL INHOMOGENEITIES
FORMATION DURING FRICTION STIR PROCESSING OF TITANIUM ALLOY
PRODUCTS OBTAINED BY WIRE-FEED ELECTRON BEAM ADDITIVE
MANUFACTURING**

© 2024 A. M. Cheremnov, D. A. Gurianov, A. V. Chumaevskii, A. E. Kobzev, V. E. Rubtsov

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

Abstract. The paper studies the regularities of structure formation in samples of titanium alloy Ti–4Al–3V obtained by additive wire-feed electron beam additive manufacturing and undergone to friction stir processing. The studies conducted show that during the processing there is an intensive interaction between the tool and the material, which leads to significant changes in the structure of the stir zone. The interaction between the nickel-base superalloy tool and the material is of an adhesive, mechanical, thermal and diffusion nature. Its characteristics determine the formation of the structure and material properties of the stir zone and, consequently, of the obtained parts. For this reason, in this study, the main defects and inhomogeneities formed in the stirred zone of the samples have been considered in comparison with the processes occurring in the area of contact between the tool and the material. The main changes in the structure of the titanium alloy Ti–4Al–3V after friction stir processing, caused by its interaction with the nickel tool, are formed in the areas of the stir zone with a composite structure with a high local volume fraction of intermetallic phases. During processing, the tool can be excessively penetrated in the material in such a way that it touches the substrate in the lower part of the plate. Even a slight penetration of the tool into the substrate leads to the penetration of steel particles into the stir zone due to the vertical flow of material in the stir zone. The described changes with the formation of a number of inhomogeneities and defects in the structure after processing lead to a decrease in the plasticity and strength of the samples in comparison with the material with a defect-free structure.

Keywords: electron beam additive manufacturing, mechanical properties, friction stir processing, tool-material interaction, titanium alloys

Acknowledgements. The studies were carried out using the equipment of the NANOTECH Shared-use Center of ISPMS SB RAS.

Funding. This research project was supported by the Russian Science Foundation under grant No 22-29-20172, <https://rscf.ru/en/project/22-29-20172/>.

For citation: Cheremnov A.M., Gurianov D.A., Chumaevskii A.V., Kobzev A.E., Rubtsov V.E. Regularities of defects and structural inhomogeneities formation during friction stir processing of titanium alloy products obtained by wire-feed electron beam additive manufacturing. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):58–68. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-58-68](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-58-68)

Введение

В последние годы интенсивное развитие получили технологии аддитивного производства изделий из различных металлов и сплавов [1]. Наиболее экономичными и применимыми из них являются высокопроизводительные технологии проволоочной дуговой [2] и электронно-лучевой [3] 3D-печати. Электронно-лучевая аддитивная технология [3], имеющая общую физическую природу с электронно-лучевой обработкой [4] и прочими процессами, основанными на использовании электронного пучка, позволя-

ет с высокой скоростью получать различные изделия, в том числе с композитной или функционально-градиентной структурой [5]. С использованием аддитивных технологий возможно получение широкого спектра изделий со значительными различиями не только по форме, но и по структуре и фазовому составу [6]. Посредством современных технологий 3D-печати возможно изготовление изделий с наличием градиента свойств от одного участка к другому [7]. Они классифицируются как функционально-градиентные детали или материалы [8]. Изделия

такого типа получают различными методами, в том числе с использованием порошковой [9, 10] или проволочной [3] технологий. Благодаря их применению, возможно формирование оптимизированных как с точки зрения формы и размеров, так и структуры, свойств деталей, экономя дорогостоящие легирующие элементы в основном объеме, вводя их только в тех участках, где это необходимо.

Несмотря на широко распространенные методы получения изделий с наличием функционального градиента, с точки зрения формирования плавного перехода между различными компонентами детали преимущество имеет проволочная аддитивная электронно-лучевая технология [3, 5]. В ряде экспериментальных работ отмечалось, что получаемые рассматриваемым методом материалы могут иметь высокую пластичность и относительно невысокие прочностные показатели [5]. Повышение механических свойств поверхностных слоев возможно за счет применения технологии фрикционной перемешивающей обработки [11], являющейся аналогом сварки трением с перемешиванием [12]. Такой метод достаточно широко применяется для упрочнения аддитивно-полученных изделий. Он использовался для гибридного получения образцов из термически упрочняемых [13] и неупрочняемых [14] алюминиевых сплавов. Намного меньше работ по модификации образцов, полученных аддитивным методом из титановых сплавов.

Проволочная аддитивная электронно-лучевая технология характеризуется преимущественно одними из наименьших значений пределов текучести и прочности при печати титановых сплавов [15], особенно при получении крупно-

габаритных изделий. Это ставит актуальную в настоящее время задачу повышения механических свойств именно титановых сплавов. До настоящего времени в этом направлении можно выделить небольшое количество работ, и не изученными остаются такие аспекты процесса обработки титановых сплавов, полученных аддитивным методом, как взаимодействие инструмента и материала, влияние вторичных факторов при печати (длина пина, ширина плеч, материал подложки и др.) на формируемую структуру и свойства [16; 17]. На решение этих задач направлена настоящая работа.

Материалы и методы исследования

Фрикционную перемешивающую обработку пластин титанового сплава ВТ6св (Ti – 4Al – 3V), вырезанных из аддитивно полученных заготовок, проводили инструментом из никелевого жаропрочного сплава ЖС6У по схеме, представленной на рис. 1, а. Обработку проводили от одного до четвертых проходов инструментом на лабораторном оборудовании для сварки и обработки трением с перемешиванием в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН. Внешний вид типичного образца после осуществления процесса обработки представлен на рис. 1, б. Усилие прижима инструмента к заготовке составляло 34 – 36 кН; скорость вращения – 400 об./мин; скорость продольного перемещения – 90 мм/мин; толщина пластины – 2,2 мм; длина пина – 2,2 мм; ширина плеч инструмента – 20,0 мм. В качестве подложки при обработке использовали пластину из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т.

После проведения обработки проводили вырезку образцов для структурных исследований и

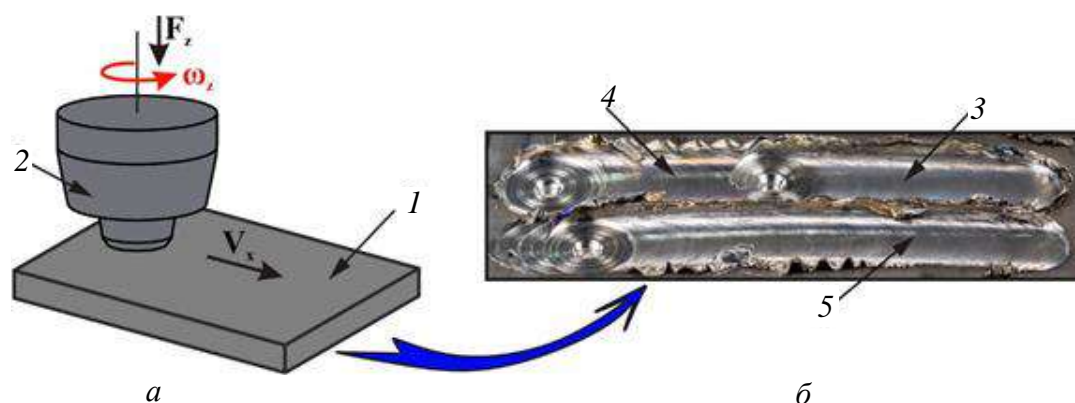


Рис. 1. Схема процесса фрикционной перемешивающей обработки аддитивно-полученных пластин титанового сплава ВТ6св (а) и внешний вид образца после эксперимента (б):

1 – образец; 2 – инструмент; 3 – 5 – образцы после первого, второго и третьего проходов инструментом вдоль линии обработки

Fig. 1. Scheme of the friction stir processing of additively obtained titanium alloy Ti–6Al–4V plates (a) and the general view of the sample after the experiment (b):

1 – sample; 2 – tool; 3 – 5 – samples after the 1st, 2nd and 3rd passes of the tool along the processing line, respectively

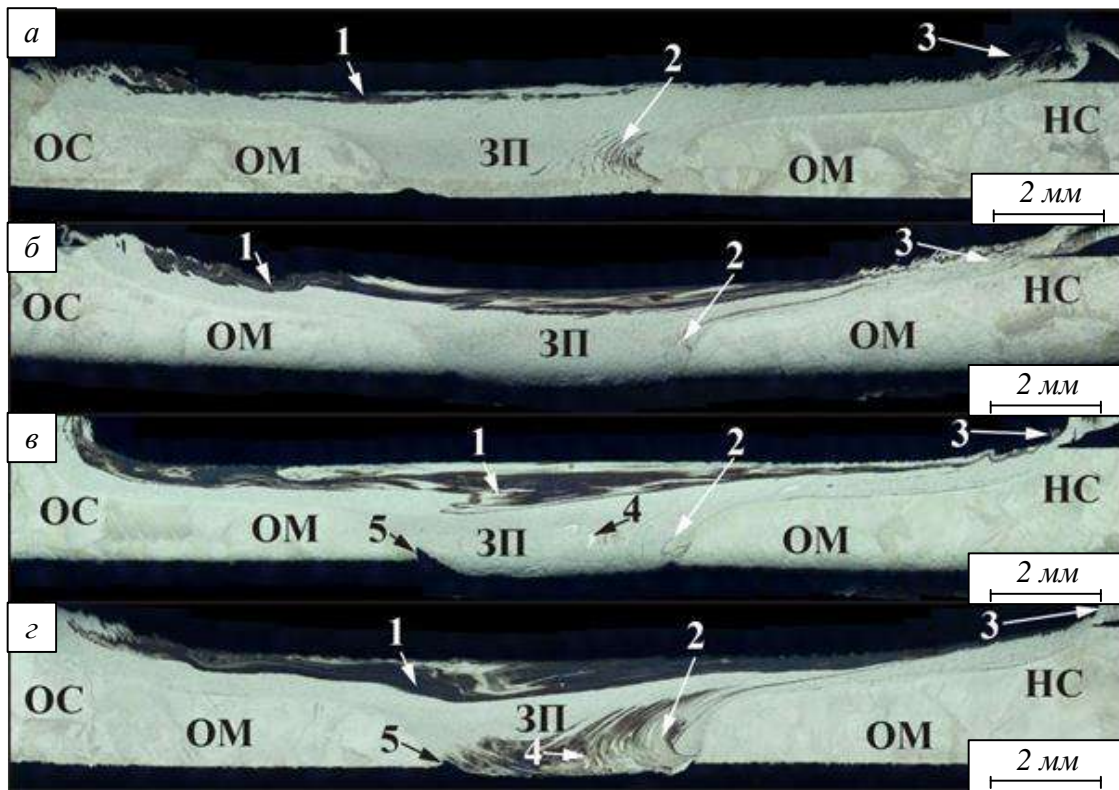


Рис. 2. Организация структуры образцов сплава ВТ6св после первого (а), второго (б), третьего (в) и четвертого (г) проходов инструментом вдоль линии обработки:

ЗП – зона перемешивания; ОМ – основной металл; НС – наступающая сторона; ОС – отступающая сторона;

1 – зона взаимной диффузии с плечами инструмента; 2 – внедрение никеля на наступающей стороне ЗП;

3 – образование наплыва; 4 – внедрение частиц стали от подложки; 5 – «подрез» нижней части пластины

Fig. 2. Organization of the structure of Ti-6Al-4V alloy specimens after the 1st (a), 2nd (б), 3rd (в) and 4th (г) tool passes along the processing line:

SZ – stir zone; BM – base metal; AS – advancing side; RS – retreating side; 1 – zone of mutual diffusion with tool shoulders;

2 – nickel penetration on the advancing side of the SZ; 3 – bead formation; 4 – penetration of steel particles from the substrate;

5 – "undercut" of the plate lower part

механических испытаний на электроэрозионном станке DK7750. Дальнейшие структурные исследования проводили на оптическом микроскопе Altamі MET 1С и лазерном сканирующем микроскопе Olympus LEXT 4100. Механические испытания проводили на универсальной испытательной машине УТС 110М. Образцы на растяжение вырезали из материала зоны перемешивания вдоль линии обработки. Образцы для структурных исследований вырезали в продольном и поперечном направлениях относительно линии обработки.

Результаты и их обсуждение

В процессе печати в образцах титанового сплава формируется типичная структура в виде вытянутых в направлении выращивания зерен первичной β -фазы, при охлаждении распадающихся с образованием пластинчатой или игольчатой форм зерен α -, α' - и β -фазы (рис. 2, 3, а – в) [15]. Фрикционная перемешивающая обработка материала приводит к формированию в образцах типичной структуры с наличием зоны перемешивания, практически неразличимых из-

за малой ширины зон термомеханического и термического влияния и зоны основного металла [18; 19] (рис. 2).

Структура материала зоны перемешивания существенно отличается от наступающей и отступающей сторон. Наиболее резкая граница зоны перемешивания и основного металла наблюдается на наступающей стороне, где направление движения инструмента совпадает с направлением деформирования материала вращающимся инструментом. В результате в этой области инициируется течение металла адгезионной природы вперед и по контуру инструмента. С отступающей стороны течение металла имеет двоякую природу и воздействие вращающегося инструмента направлено в противоположную сторону относительно направления его продольного перемещения. Течение металла имеет как адгезионную, так и экструзивную природу, перенос металла из зоны спереди инструмента – за инструмент, осуществляется через отступающую сторону соединения. Значительное выделение процесса деформации и течения металла характерно для области вблизи плеч

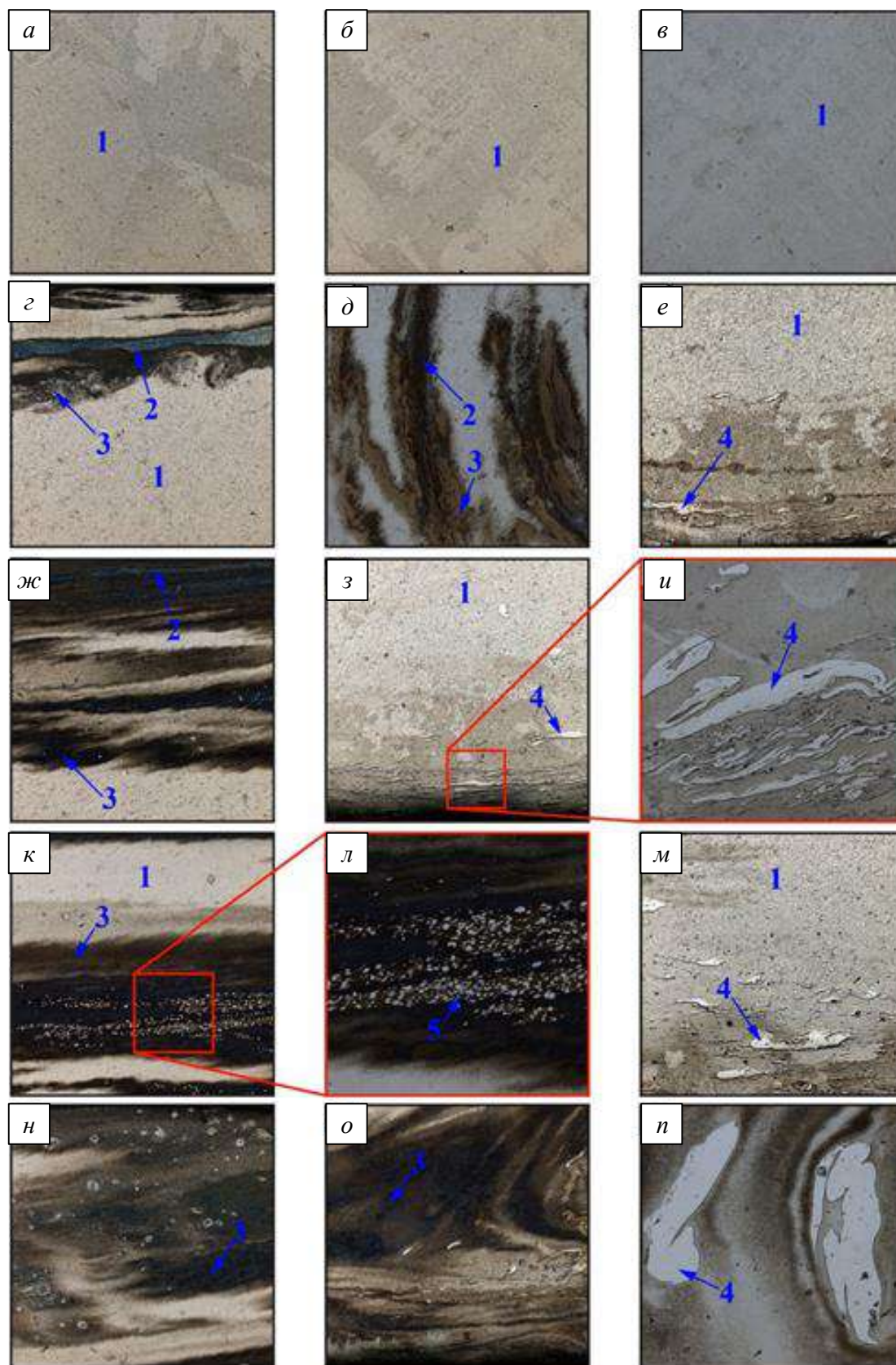


Рис. 3. Микроструктура материала в исходном титановом сплаве ВТ6св после электронно-лучевой печати (а – в), после первого (z – e), второго (жс – и), третьего (к – м) и четвертого (н – n) проходов инструментом вдоль линии обработки: 1 – зерна титана; 2 – внедренные фрагменты инструмента; 3 – твердые растворы и интерметаллидные фазы на основе титана и никеля; 4 – внедренные фрагменты стальной подложки; 5 – частицы интерметаллидов Ti_xNi_y

Fig. 3. Microstructure of the material in the initial titanium alloy Ti – 6Al – 4V after electron beam printing (a – в), after the 1st (z – e), 2nd (жс – и), 3rd (к – м) and 4th (н – n) passes through the tool along the processing line: 1 – titanium grains; 2 – penetrated tool fragments; 3 – solid solutions and intermetallic phases based on titanium and nickel; 4 – penetrated fragments of steel substrate; 5 – Ti_xNi_y intermetallide particles

инструмента, в которой с одной стороны происходит изменение направления течения металла, а с другой стороны – более длительное его взаимодействие с инструментом. Дополнительно процесс фрагментации и течения металла по контуру инструмента усложняется за счет интенсивного взаимодействия между титановым сплавом и никелевым инструментом, непосредственно в процессе обработки приводящим к взаимной диффузии и замешиванию фрагментов инструмента в материал. Такие особенности процесса обработки титановых сплавов приводят к неоднородности течения металла по контуру инструмента и определяют сложную организацию структуры в зоне перемешивания.

После обработки в макро- (рис. 2) и микро-структуре (рис. 3) образцов можно выделить увеличенное содержание фрагментов инструмента и продуктов их взаимодействия с титановой матрицей в двух основных областях: вблизи плеч инструмента (1 на рис. 2, рис. 3, *г, ж, к, л, н*) и с наступающей стороны зоны перемешивания (2 на рис. 2, 3, *д, о*). Увеличение количества проходов инструментом вдоль линии обработки приводит к повышению содержания никеля и интерметаллидов Ti_xNi_y в матрице титанового сплава ВТ6св (рис. 2, *а – г, 3, г, д, ж, к, л, н, о*). Помимо фрагментов инструмента и областей с плавно изменяющейся структурой от основного металла к замешанным частицам никелевого сплава, в зоне перемешивания формируются области с достаточно крупными частицами интерметаллидных фаз (5 на рис. 3, *к, л*). Частицы формируются в широком центральном потоке с замешанным материалом инструмента в подплечевой области (1 на рис. 2). Данные энергодисперсионного анализа показывают, что содержание никеля и титана в областях с плавно изменяющейся структурой соответствуют твердым растворам на основе титана, а в частицах – интерметаллидам состава Ti_2Ni . В области с наступающей стороны зоны перемешивания (2 на рис. 2) при увеличении количества проходов вдоль линии обработки также происходит накопление частиц инструмента и интерметаллидных фаз. Максимальная объемная доля таких включений достигается на четвертом проходе.

Интенсивное деформационное и диффузионное взаимодействие [20; 21] материала и инструмента приводит к избыточному углублению последнего в поверхность заготовки с образованием грата или наплывов на лицевой поверхности (3 на рис. 2). Углубление инструмента в материал заготовки при изначально совпадающей длине пина и толщине пластины привело к внедрению пина примерно на 0,2 мм в подложку из нержавеющей стали. В результате начиная с

первого прохода инструментом вдоль линии обработки в материале нижней части зоны перемешивания наблюдается внедрение частиц стали (4 на рис. 2, *в, з, 3, е, з, и, м, п*). Наиболее существенным замешивание стали становится после четырех проходов инструментом (4 на рис. 3, *п*). После обработки за счет этого эффекта образец отделяется от подложки только при приложении усилия. Этому способствует взаимная диффузия титановой пластины и стальной подложки и их частичное механическое перемешивание. При этом высокой прочности сцепления подложки и пластины препятствует образование интерметаллидной прослойки между ними за счет взаимной диффузии, а также достаточно небольшая глубина проникновения пина в подложку. После отрыва образца от подложки с двух сторон зоны перемешивания происходит образование углубления (подреза) в нижней части пластины, что обусловлено вдавливанием при обработке стали в материал титанового сплава.

При анализе структуры зоны перемешивания в продольном сечении с использованием растровой электронной микроскопии было выявлено, что в зоне перемешивания за счет образования потоков металла от подложки вверх происходит реализация вертикального переноса металла с внедрением частиц стали в титановый сплав (рис. 4). В потоках металла (1 на рис. 4), по данным энергодисперсионного анализа, наблюдается внедрение как фрагментов никелевого инструмента (4 на рис. 4), так и частиц стали различного размера (2, 3 на рис. 4). Внедрение частиц стали происходит с некоторым изменением направления течения металла (3 на рис. 4). В зоне внедренных частиц видоизменяются потоки металла, происходит отрыв фрагментов крупных частиц с образованием частиц меньшего размера (3 на рис. 4, *б*). Термические напряжения, вызванные различиями в значениях коэффициента теплового расширения стали и титана, приводят к формированию трещин в крупных внедрениях стали в зоне перемешивания. По причине неоднородности перемешивания материалов подложки и титановой пластины после их разделения нижняя часть пластины обладает неровной формой, повторяющей зону контакта инструмента и подложки при обработке (5 на рис. 4).

Неоднородности процесса обработки, формирование дефектов, внедрение частиц инструмента и подложки в материал зоны перемешивания приводят к реализации достаточно низких механических свойств (рис. 5). Обработка в один проход инструментом приводит к резкому снижению пластичности с 16,2 до 1,5 % и уве-

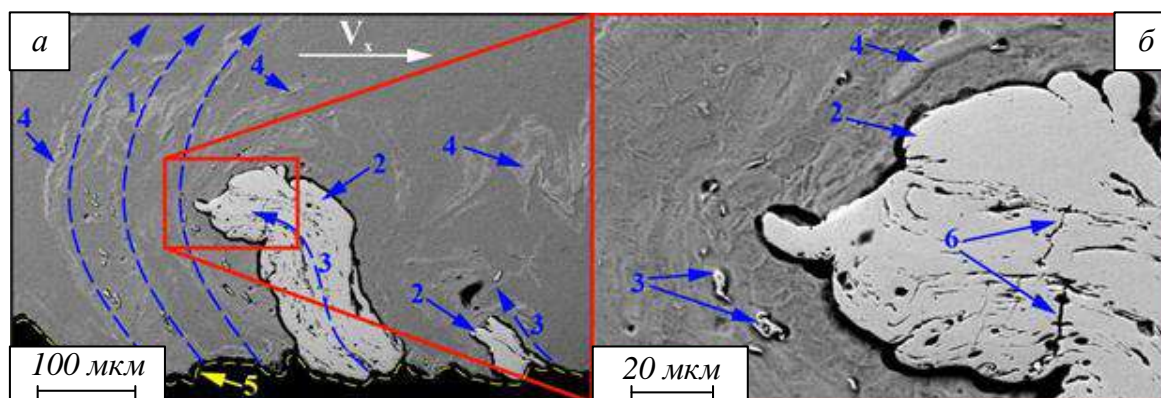


Рис. 4. Организация структуры в нижней части зоны перемешивания в продольном сечении (а) и внедрение крупных и мелких частиц стали в материал образца (б):

1 – направление течения металла; 2 – крупный фрагмент стали, замешанный в материал; 3 – направление течения в стальном фрагменте; 4 – внедренные в материал частицы инструмента; 5 – неравномерность нижней границы, обусловленная контактом инструмента и подложки; 6 – трещины в стальном фрагменте; 7 – мелкие частицы стали

Fig. 4. Structure organization in the lower part of the stir zone in the longitudinal section (a) and penetration of large and small steel particles into the sample material (b):

1 – metal flow direction; 2 – large steel fragment penetrated in the material; 3 – flow direction in the steel fragment; 4 – tool particles penetrated in the material; 5 – non-uniformity of the lower boundary caused by the contact between the tool and the substrate; 6 – cracks in the steel fragment; 7 – small steel particles.

личению предела текучести с 480 до 720 МПа, а предела прочности с 590 до 730 МПа. Дальнейшие проходы инструментом вдоль линии обработки за счет накопления в материале частиц износа инструмента и замешанных фрагментов подложки приводят к снижению пластичности практически до нулевых значений без существенного увеличения прочности. Локальная неоднородность структуры и формирование дефектов обуславливает, в том числе реализацию более низких прочностных показателей образцов даже в сравнении с основным металлом. После трех проходов инструментом один из образцов разрушился при напряжениях 304 МПа за счет наличия дефекта в рабочей части лопатки.

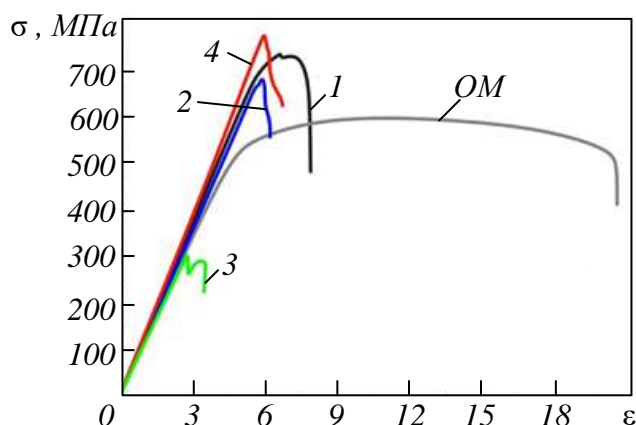


Рис. 5. Диаграмма напряжение – деформация образцов основного металла (ОМ) и после проходов инструментом (1 – 4) вдоль линии обработки

Fig. 5. Stress-strain diagrams of base metal samples (OM) and after tool passes along (1 – 4) the processing line

Выводы

Проведенные исследования показывают, что в процессе фрикционной перемешивающей обработки титановых сплавов даже незначительного углубления пина инструмента в подложку достаточно чтобы инициировать деформацию, фрагментацию и пластическое течение ее материала в зону перемешивания. Взаимодействие инструмента и материала приводит к неравномерному изменению состава зоны перемешивания со значительным обогащением подплечевой зоны и наступающей стороны. Внедрение в нижней части зоны перемешивания фрагментов подложки приводит к образованию дефектов на поверхности и внутри материала. Одновременные процессы взаимодействия инструмента и титанового сплава, а также внедрения фрагментов подложки в зону перемешивания приводят к формированию макроскопически неоднородной структуры и образованию дефектов различного типа. Неоднородности структуры и образующиеся дефекты в зоне перемешивания приводят к реализации в материале невысоких и нестабильных значений механических свойств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2018;92:112–224. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
2. Ван Я., Коновалов С.В., Чэн С., Панченко И.А., Коток М.М. Исследование влияния термической обработки на сплавы системы Cu –

- Al, полученные проволочно-дуговым аддитивным способом. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;1(43):89–97.
[http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-89-97](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-89-97)
3. Astafurova E.A., Astafurov S.V., Reunova K.A., Melnikov E.V., Moskvina V.A., Panchenko M.Yu., Maier G.G., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Structure Formation in Vanadium-Alloyed Chromium-Manganese Steel with a High Concentration of Interstitial Atoms C + N = 1.9 wt % during Electron-Beam Additive Manufacturing. *Physical Mesomechanic*. 2022;25(1):1–11.
<https://doi.org/10.1134/S1029959922010015>; EDN: FXWPYU.
 4. Гэн Я., Панченко И.А., Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Чен С. Влияние электронно-пучковой обработки на структуру аддитивного сплава Al–Mg. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;2(44):13–19.
[https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-13-19](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-13-19); EDN:HEJAEC.
 5. Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Chumaevsky A.V., Astafurova E.G. Micro-, meso- and macrostructural design of bulk metallic and polycrystalline materials by wire-feed electron-beam additive manufacturing. *Physical Mesomechanic*. 2022;25(6):479–491.
<http://dx.doi.org/10.1134/S1029959922060017>
 6. Niendorf T., Leuders S., Riemer A., Brenne F., Tröster T., Albert Richard H., Schwarze D. Functionally Graded Alloys Obtained by Additive Manufacturing. *Advanced engineering materials*. 2014;16(7):857–861.
<https://doi.org/10.1002/adem.201300579>
 7. Su Y., Chen B., Tan C., Song X., Feng J. Influence of composition gradient variation on the microstructure and mechanical properties of 316L/Inconel718 functionally graded material fabricated by laser additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;283:116702.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116702>
 8. Muller P., Hascoet J.-Y., Mognol P. Toolpaths for additive manufacturing of functionally graded materials (FGM) parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2014;20(6):511–522.
<https://doi.org/10.1108/rpj-01-2013-0011>
 9. Sun Z., Chueh Y.-H., Li L. Multiphase mesoscopic simulation of multiple and functionally gradient materials laser powder bed fusion additive manufacturing processes. *Additive Manufacturing*. 2020;35:101448.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2020.101448>
 10. Ghanavati R., Naffakh-Moosavy H. Additive manufacturing of functionally graded metallic materials: A review of experimental and numerical studies. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;13:1628–1664.
<https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.05.022>
 11. Mironov S., Sato Y.S., Kokawa H. Grain Structure Evolution during Friction-Stir Welding. *Physical Mesomechanic*. 2020;23(1):21–31.
<https://doi.org/10.1134/S1029959920010038>
 12. Arif M., Malik W., Mir M.A., Ahmad T., Lone N.F., Siddiquee A.N. Green welding. Exploring the environmental and health benefits of friction stir welding over conventional welding methods. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;1(43):83–88.
[https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-83-88](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-83-88); EDN:TZAXLM.
 13. Qie M., Wei J., He C. Microstructure evolution and mechanical properties of wire-arc additive manufactured Al–Zn–Mg–Cu alloy assisted by interlayer friction stir processing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023;24:2891–2906.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.205>
 14. Cui J., Guo X., Hao S., Guo X., Xu R., Achieving high strength-ductility properties of wire-arc additive manufactured Al-Mg-Sc aluminum alloy via friction stir processing post-treatment and high temperature aging treatment. *Materials Letters*. 2023;350:134913.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134913>
 15. Klimenov V., Kolubaev E., Anatoly K., Chumaevskii A., Ustinov A., Strelkova I., Rubtsov V., Gurianov D., Han Z., Nikonov S., Batranin A., Khimich M. Influence of the Coarse Grain Structure of a Titanium Alloy Ti–4Al–3V Formed by Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing on Strain Inhomogeneities and Fracture. *Materials*. 2023;16(11):3901.
<https://doi.org/10.3390/ma16113901>
 16. Du S., Liu H., Jiang V., Zhou L., Gao F. The performance of a Co-based alloy tool in the friction stir welding of TA5 alloy. *Wear*. 2022;488–489:204180.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204180>
 17. Mashinini P.M., Dinaharan I., David Raja Selvam J., Hattingh D.G. Microstructure evolution and mechanical characterization of friction stir welded titanium alloy Ti–6Al–4V using lanthanated tungsten tool. *Materials Characterization*. 2018;139:328–336.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2018.03.020>
 18. Seighalani K.R., Givi M.K.B., Nasiri A.M., Bahemmat P. Investigations on the effects of

the tool material, geometry, and tilt angle on friction stir welding of pure titanium. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2010;19(7):955–962.

<http://dx.doi.org/10.1007/s11665-009-9582-8>

19. Buffa G., Fratini L., Micari F. Mechanical and microstructural properties prediction by artificial neural networks in FSW processes of dual phase titanium alloys. *Journal of Manufacturing Processes*. 2012;14(3):289–296.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2011.10.007>
20. Zykova A., Vorontsov A., Chumaevskii A., Gurianov D., Gusarova A., Kolubaev E., Tarasov S. Structural evolution of contact parts of the friction stir processing heat-resistant nickel alloy tool used for multi-pass processing of Ti6Al4V/(Cu+Al) system. *Wear*. 2022;488–489:204138.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204138>; EDN: SPJDGX.
21. Zykova A.P., Tarasov S.Y., Chumaevskiy A.V., Kolubaev E.A. A review of friction stir processing of structural metallic materials: Process, properties, and methods. *Metals*. 2020;10(6):772.

REFERENCES

1. DebRoy T., Wei H.L., Zuback J.S., Mukherjee T., Elmer J.W., Milewski J.O., Beese A.M., Wilson-Heid A., De A., Zhang W. Additive manufacturing of metallic components—Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2018;92:112–224.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
2. Wang Ya., Konovalov S.V., Chen X., Panchenko I.A., Kotok M.M. Investigation of the effect of heat treatment on alloys of the Si – Al system obtained by the wire-arc additive method. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;1(43):89–97. (In Russ.).
[http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-89-97](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-89-97)
3. Astafurova E.A., Astafurov S.V., Reunova K.A., Melnikov E.V., Moskvina V.A., Panchenko M.Yu., Maier G.G., Rubtsov V.E., Kolubaev E.A. Structure Formation in Vanadium-Alloyed Chromium-Manganese Steel with a High Concentration of Interstitial Atoms C + N = 1.9 wt % during Electron-Beam Additive Manufacturing. *Physical Mesomechanic*. 2022;25(1):1–11.
<https://doi.org/10.1134/S1029959922010015>; EDN: FXWPYU.
4. Geng Ya., Panchenko I.A., Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Chen X. Effect of electron beam processing on the structure and properties of the Al – Mg additive alloys. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. (In Russ.).
[https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-13-19](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-13-19); EDN: HEJAEC.
5. Kolubaev E.A., Rubtsov V.E., Chumaevskiy A.V., Astafurova E.G. Micro-, Meso- and Macrostructural Design of Bulk Metallic and Polymetallic Materials by Wire-Feed Electron-Beam Additive Manufacturing. *Physical Mesomechanic*. 2022;25(6):479–491.
<http://dx.doi.org/10.1134/S1029959922060017>
6. Niendorf T., Leuders S., Riemer A., Brenne F., Tröster T., Albert Richard H., Schwarze D. Functionally Graded Alloys Obtained by Additive Manufacturing. *Advanced engineering materials*. 2014;16(7):857–861.
<https://doi.org/10.1002/adem.201300579>
7. Su Y., Chen B., Tan C., Song X., Feng J. Influence of composition gradient variation on the microstructure and mechanical properties of 316L/Inconel718 functionally graded material fabricated by laser additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2020;283:116702.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116702>
8. Muller P., Hascoet J.-Y., Mognol P. Toolpaths for additive manufacturing of functionally graded materials (FGM) parts. *Rapid Prototyping Journal*. 2014;20(6):511–522.
<https://doi.org/10.1108/rpj-01-2013-0011>
9. Sun Z., Chueh Y.-H., Li L. Multiphase mesoscopic simulation of multiple and functionally gradient materials laser powder bed fusion additive manufacturing processes. *Additive Manufacturing*. 2020;35:101448.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2020.101448>
10. Ghanavati R., Naffakh-Moosavy H. Additive manufacturing of functionally graded metallic materials: A review of experimental and numerical studies. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;13:1628–1664.
<https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2021.05.022>
11. Mironov S., Sato Y.S., Kokawa H. Grain Structure Evolution during Friction-Stir Welding. *Physical Mesomechanic*. 2020;23(1):21–31.
<https://doi.org/10.1134/S1029959922010038>
12. Arif M., Malik W., Mir M.A., Ahmad T., Lone N.F., Siddiquee A.N. Green welding. Exploring the environmental and health benefits of friction stir welding over conventional welding methods. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;1(43):83–88.
[https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-83-88](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-83-88); EDN: TZAXLM.
13. Qie M., Wei J., He C. Microstructure evolution and mechanical properties of wire-arc additive manufactured Al–Zn–Mg–Cu alloy assisted by interlayer friction stir processing. *Journal of Materials Research and Technology*.

- 2023;24:2891–2906.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.03.205>
14. Cui J., Guo X., Hao S., Guo X., Xu R., Achieving high strength-ductility properties of wire-arc additive manufactured Al-Mg-Sc aluminum alloy via friction stir processing post-treatment and high temperature aging treatment. *Materials Letters*. 2023;350:134913.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134913>
15. Klimenov V., Kolubaev E., Anatoly K., Chumaevskii A., Ustinov A., Strelkova I., Rubtsov V., Gurianov D., Han Z., Nikonov S., Batranin A., Khimich M. Influence of the Coarse Grain Structure of a Titanium Alloy Ti-4Al-3V Formed by Wire-Feed Electron Beam Additive Manufacturing on Strain Inhomogeneities and Fracture. *Materials*. 2023;16(11):3901.
<https://doi.org/10.3390/ma16113901>
16. Du S., Liu H., Jiang V., Zhou L., Gao F. The performance of a Co-based alloy tool in the friction stir welding of TA5 alloy. *Wear*. 2022;488-489:204180.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204180>
17. Mashinini P.M., Dinaharan I., David Raja Selvam J., Hattingh D.G. Microstructure evolution and mechanical characterization of friction stir welded titanium alloy Ti-6Al-4V using lanthanated tungsten tool. *Materials Characterization*. 2018;139:328–336.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2018.03.020>
18. Seighalani K.R., Givi M.K.B., Nasiri A.M., Bahemmat P. Investigations on the effects of the tool material, geometry, and tilt angle on friction stir welding of pure titanium. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2010;19(7):955–962.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11665-009-9582-8>
19. Buffa G., Fratini L., Micari F. Mechanical and microstructural properties prediction by artificial neural networks in FSW processes of dual phase titanium alloys. *Journal of Manufacturing Processes*. 2012;14(3):289–296.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2011.10.007>
20. Zykova A., Vorontsov A., Chumaevskii A., Gurianov D., Gusarova A., Kolubaev E., Tarasov S. Structural evolution of contact parts of the friction stir processing heat-resistant nickel alloy tool used for multi-pass processing of Ti6Al4V/(Cu+Al) system. *Wear*. 2022;488–489:204138.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204138>; EDN: SPJDGX.
21. Zykova A.P., Tarasov S.Y., Chumaevskiy A.V., Kolubaev E.A. A review of friction stir processing of structural metallic materials: Process, properties, and methods. *Metals*. 2020;10(6):772.
<http://dx.doi.org/10.3390/met10060772>
- Сведения об авторах**
Андрей Максимович Черемнов, младший научный сотрудник лаборатории структурного дизайна перспективных материалов, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
Email: amc@ispms.ru
- Денис Андреевич Гурьянов**, к.т.н., младший научный сотрудник лаборатории локальной металлургии в аддитивных технологиях, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
Email: desa-93@mail.ru
ORCID: 0000-0003-0725-1219
- Андрей Валерьевич Чумаевский**, д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории локальной металлургии в аддитивных технологиях, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
Email: tch7av@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1983-4385
- Александр Евгеньевич Кобзев**, младший научный сотрудник лаборатории контроля качества материалов и конструкций, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
Email: kobzev.tomsk@mail.ru
- Валерий Евгеньевич Рубцов**, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией контроля качества материалов и конструкций, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН
Email: rvy@ispms.ru
ORCID: 0000-0003-0348-1869
- Information about the authors:**
Andrei M. Cheremnov, postgraduate student, Junior researcher at the Laboratory of Structural Design of Advanced Materials, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
Email: amc@ispms.ru
- Denis A. Gurianov**, Cand. Sci. (Eng.), Junior researcher at the Laboratory of Local Metallurgy in Additive Technologies, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
Email: desa-93@mail.ru
ORCID: 0000-0003-0725-1219
- Andrei V. Chumaevskii**, Cand. Sci. (Eng.), Leading researcher of Laboratory of Local Metallurgy in Additive Technologies, Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
Email: tch7av@gmail.com
ORCID: 0000-0002-1983-4385
- Aleksandr E. Kobzev**, Junior researcher of Laboratory of quality control of materials and structures, Institute of

Strength Physics and Materials Science of Siberian
Branch of Russian Academy of Sciences

Email: rvy@ispms.ru

ORCID: 0000-0003-0348-1869

*Valerii E. Rubtsov, Cand. Sci. (Phys.-math.), Leading
researcher, Head of Laboratory of quality control of ma-
terials and structures, Institute of Strength Physics and
Materials Science of Siberian Branch of Russian Acade-
my of Sciences*

Email: rvy@ispms.ru

ORCID: 0000-0003-0348-1869

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта инте-
ресов.*

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 28.11.2023

После доработки 05.12.2023

Принята к публикации 07.12.2023

Received 28.11.2023

Revised 05.12.2023

Accepted 07.12.2023

Оригинальная статья

УДК 621.789:538.911

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-69-80

**ДИНАМИКА ДЕФОРМАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ СПЛАВА АК10М2Н
ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ**

© 2024 г. А. А. Абатурова, Д. В. Загуляев, А. А. Серебрякова

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

Аннотация. Представлены результаты исследования деформационных характеристик сплава АК10М2Н без обработки и после применения обработки электронным пучком. Образцы были подвержены разрушению в процессе растяжения. Получены количественные данные о деформации образцов, построены деформационные инженерные и истинные кривые не облученного и облученного образцов. Проанализирована динамика средних пределов прочности и текучести, относительного остаточного удлинения и сужения при разрыве в зависимости от плотности энергии и длительности импульса пучка электронов. Плотность энергии пучка электронов и длительность импульсов находилась в интервале от 10 до 50 Дж/см² и от 50 до 200 мкс. Выявлен наиболее рациональный режим электронно-пучковой обработки, приводящий к увеличению пластических и прочностных свойств сплава АК10М2Н. Установлено влияние электронно-пучковой обработки с плотностью энергии пучка электронов 50 Дж/см² и длительности импульса пучка электронов 200 мкс на деформационные характеристики сплава АК10М2Н. Рассматриваемый режим приводит к увеличению предела прочности (75 %) по сравнению с пределом прочности литого сплава. Выявлено, что относительное остаточное удлинение и сужение при разрыве увеличивается после электронно-пучковой обработки. Анализ деформационных кривых позволил выявить стадии деформации. На второй стадии деформации выявлены участки с разными углами наклона (с разными коэффициентами деформационного упрочнения). В процессе растяжения образцов получены спекл-картины. При изучении спекл-картин установлено, что происходит увеличение размеров локальных очагов деформации в центральной части необлученных образцов, что также подтверждает результативность обработки электронным пучком.

Ключевые слова: растяжение, силумин, электронно-пучковая обработка, деформационные кривые, спекл-картины

Для цитирования: Абатурова А.А., Загуляев Д.В., Серебрякова А.А. Динамика деформационного поведения сплава АК10М2Н при электронно-пучковой обработке. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):69–80. [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2024-1\(47\)-69-80](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2024-1(47)-69-80)

Original article

**DYNAMICS OF DEFORMATION BEHAVIOR OF AK10M2N ALLOY DURING
ELECTRON BEAM TREATMENT**

© 2024 A. A. Abaturova, D. V. Zaguliaev, A. A. Serebryakova

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

Abstract. The results of a study of the deformation characteristics of the AK10M2N alloy without treatment and after the application of electron beam treatment are presented. The samples were susceptible to destruction during the stretching process. Quantitative data on the deformation of samples were obtained, deformation engineering and true curves of non-irradiated and irradiated samples were constructed. The dynamics of the average strength and

yield strength, relative residual elongation and contraction at rupture, depending on the energy density of the electron beam and the pulse duration of the electron beam, are analyzed. The energy density of the electron beam and the pulse duration ranged from 10 to 50 J/cm² and from 50 to 200 microseconds. The most rational mode of electron beam processing has been identified, leading to an increase in the plastic and strength properties of the AK10M2N alloy. The effect of electron beam processing with an electron beam energy density of 50 J/cm² and an electron beam pulse duration of 200 microseconds on the deformation characteristics of the AK10M2N alloy has been established. The considered mode leads to an increase in the tensile strength (75 %) compared to the strength limit of the cast alloy. It is revealed that the value of the relative residual elongation and contraction at rupture increases after electron beam processing. The analysis of the deformation curves allowed us to identify the stages of deformation. At the second stage of deformation, areas with different angles of inclination (with different coefficients of deformation hardening) were identified. Speckle patterns were obtained in the process of stretching the samples. When studying speckle patterns, it was found that there is an increase in the size of local deformation foci in the central part of non-irradiated samples, which also confirms the effectiveness of electron beam processing.

Keywords: stretching, silumin, electron beam processing, deformation curves, speckle patterns

For citation: Abaturova A.A., Zagulyaev D.V., Serebryakova A.A. Dynamics of the deformation behavior of the AK10M2N alloy during electron beam processing. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):69–80. [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2024-1\(47\)-69-80](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2024-1(47)-69-80)

Введение

В настоящее время для развития техники и технологии требуется разработка и производство новых материалов, которые бы обладали повышенными функциональными свойствами, а также могли бы заменить традиционно используемые материалы [1].

Перспективные материалы, которые способны заменить стали, являются алюминий и сплавы на его основе. Связано это с двумя обстоятельствами. Во-первых, алюминий достаточно распространенный металл (третий элемент после кислорода и кремния по массовому содержанию в твердой земной коре и первый среди металлов). Во-вторых, алюминий обладает уникальными свойствами. Плотность алюминия примерно в три раза меньше чем стали; это пластичный, в меру прочный, ковкий металл, который при отливке, легко принимает любые формы, а оксидная пленка, формирующаяся на его поверхности, делает его устойчивым к коррозии; обладает высокой электропроводностью; не токсичен; легко перерабатывается [2 – 4].

Ограничивающим фактором сферы использования алюминия, являются его сравнительно низкие прочностные свойства. Одним из распространенных методов упрочнения алюминия является добавление легирующих элементов, например,

кремния [5 – 7] в процессе литья, но и этого в последнее время становится недостаточно [8 – 12]. Следует отметить, что традиционный метод упрочнения (термическая обработка) малоэффективен для сплавов Al – Si, поскольку растворимость кремния слабо зависит от температуры до 660,3 °С (температура плавления алюминия) [13 – 15]. В связи с этим приходится прибегать к более современным методам увеличения прочностных свойств, в частности к обработке концентрированными потоками энергии [16; 17]. К хорошо зарекомендовавшим методам поверхностного упрочнения относится электронно-пучковая обработка [18 – 21].

Настоящая работа является актуальной, поскольку направлена на изменение свойств сплава АК10М2Н методом электронно-пучковой обработки.

Материалы и методика

С целью проведения испытаний на растяжение методами электроэрозионной резки из массивного слитка сплава АК10М2Н были изготовлены плоские пропорциональные образцы для растяжения, которые имели вид двухсторонних лопаток в соответствии с ISO 6892-1:2016 Metallic materials — Tensile testing — Part 1: Method of test at room temperature (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид образцов для испытаний
Fig. 1. General view of the test samples

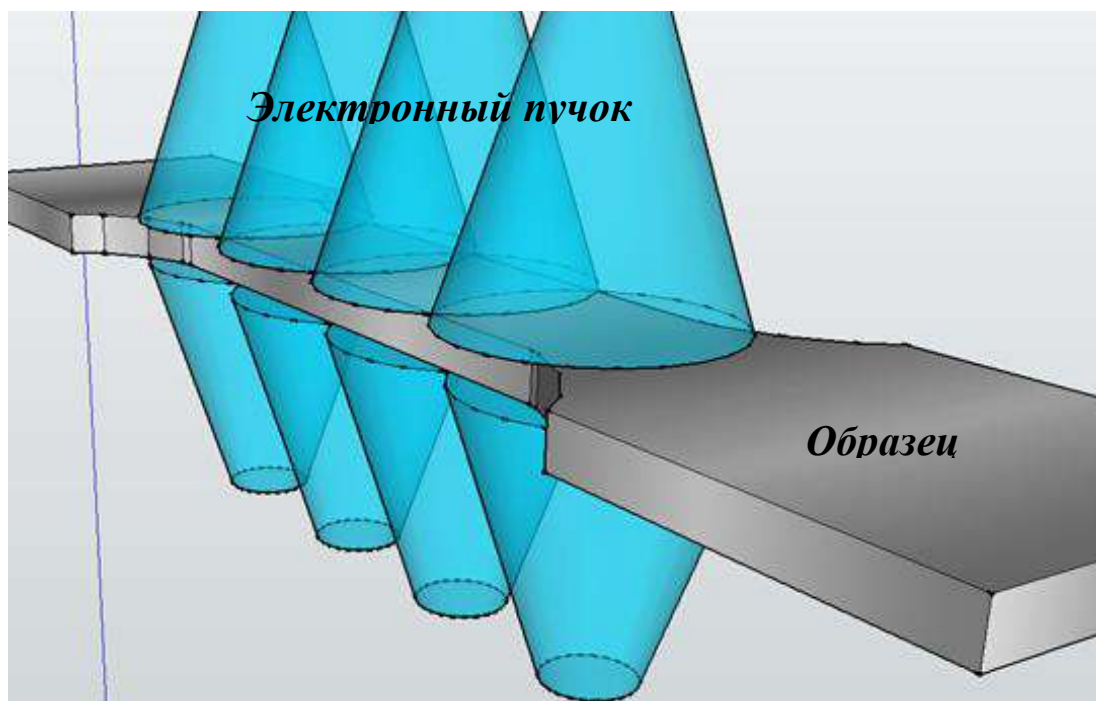


Рис. 2. Ориентация образца относительно электронного пучка
 Fig. 2. Orientation of the sample relative to the electron beam

Полученные заготовки подвергали полировке алмазными пастами различной дисперсности. Перед испытаниями образцы имели следующие размеры: толщина 2,3 мм; ширина 9,1 мм; длина рабочей части 16,0 мм. Полированные образцы были разделены на две партии. Первую партию образцов оставляли не облученной. Рабочую область второй партии образцов облучали с двух сторон (рис. 2) в вакууме импульсным электронным пучком на установке СОЛЮ.

Общие для всех режимов воздействия параметры пучка электронов следующий: энергия ускоренных электронов 17 кэВ, количество импульсов 3, частота следования импульсов $0,3 \text{ с}^{-1}$; давление остаточного газа (аргон) в рабочей камере установки $2 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$. Плотность энергии пучка электронов и длительность импульсов варьировали в интервале от 10 до 50 Дж/см² и от 50 до 200 мкс. Режимы электронно-пучковой обработки представлены ниже:

Режим	Плотность энергии пучка электронов, Дж/см ²	Длительность импульсов, мкс
1	10	50
2	20	
3	30	
4	40	
5	50	
1a	10	200
2a	20	
3a	30	
4a	40	
5a	50	

Общий вид образцов после модифицирования представлен на рис. 3.

Разрушение всех образцов в режиме растяжения осуществляли на установке INSTRON 3386 с постоянной скоростью 2,0 мм/мин, не менее чем по три образца для каждого режима электронного пучка. Общий вид образцов сплава АК10М2Н, разрушенных в исходном состоянии и после электронно-пучковой обработки по режимам 1, 3, 5, приведен на рис. 4. По полученным данным были построены зависимости средних пределов прочности и текучести, относительного остаточного удлинения и сужения при разрыве от плотности энергии пучка электронов и длительности импульса пучка электронов, для каждого из исследуемых материалов.

Результаты и обсуждение

Данные, полученные при растяжении сплава АК10М2Н, представлены на рис. 5, погрешность эксперимента не превышала 10 %.

Зависимость предела прочности от плотности энергии пучка электронов (рис. 5, а) показывает, что электронно-пучковая обработка при таких параметрах нагружения не влияет на предел прочности или приводит к его снижению. Предел текучести (рис. 5, б) показывает положительную динамику, выходящую за пределы погрешности измерения (для параметров обработки 10 и 30 Дж/см², 50 мкс составляет 56 и 55 %).

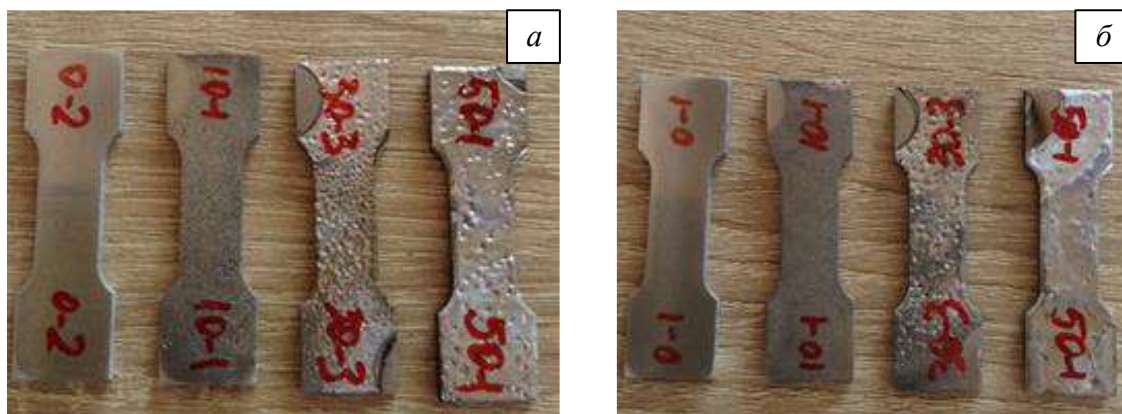


Рис. 3. Общий вид образцов сплава АК10М2 после облучения электронным пучком 50 (а) и 200 мкс (б)
 Fig. 3. General view of the AK10M2 alloy samples after irradiation with an electron beam of 50 (a) and 200 microseconds (b)

Зависимость относительного остаточного удлинения при разрыве от плотности энергии пучка электронов (рис. 5, в) показывает, что статистически значимое снижение рассматриваемого параметра наблюдается для параметров обработки 15 Дж/см², 50 мкс и 30, 50 Дж/см², 200 мкс. Снижение этого параметра косвенно свидетельствует об уменьшении пластических свойств материала. Абсолютная разность максимального и минимального значений относительного остаточного сужения при разрыве (рис. 5, з) составляет 0,022 % ($0,893 \pm 0,015 \div 0,874 \pm 0,015$ %), что не выходит за пределы доверительного интервала. Это свидетельствует об отсутствии влияния электронно-пучковой обработки на относительное остаточное сужение при разрыве.

При скорости нагружения 2,0 мм/мин установлено, что статистически значимое увеличение предела текучести сплава АК10М2Н наблюдается для параметров обработки 10 и 30 Дж/см², 50 мкс.

Следует отметить, что не для одного из представленных режимов не обнаружено статистически значимое увеличение основной характеристики прочностных свойств (предела прочности на разрыв).

В связи с неоднозначностью установленных зависимостей было принято решение расширить массив данных путем проведения исследований при скорости деформирования 1,25 мм/мин.

Обобщенные данные, полученные при растяжении сплава АК10М2Н со скоростью 1,25 мм/мин, представлены на рис. 6.

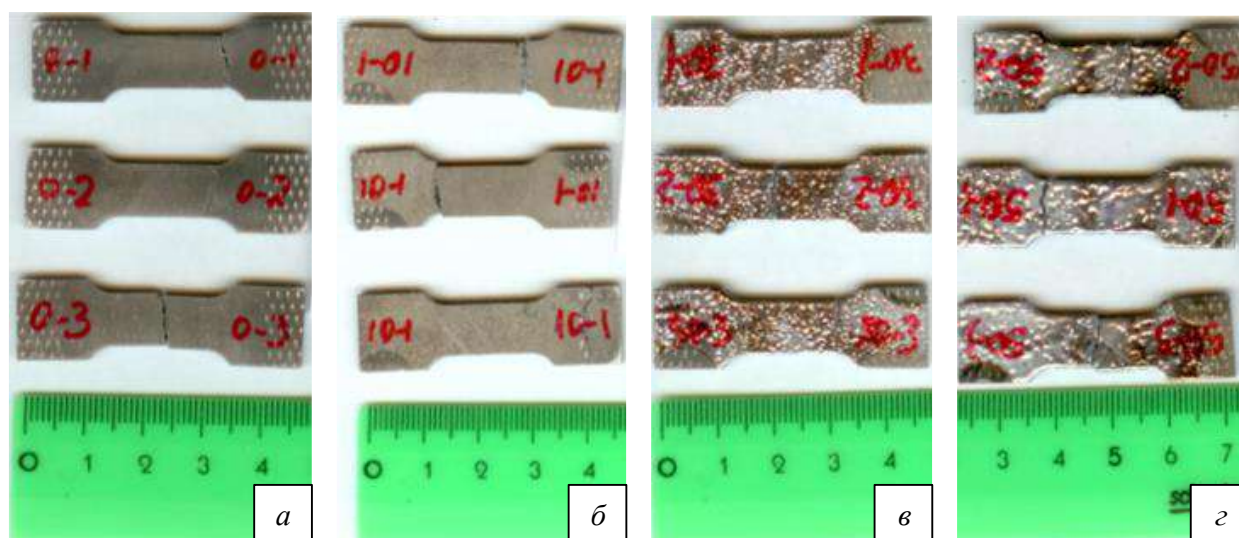


Рис. 4. Общий вид образцов после одноосного растяжения до разрушения:
 а – исходный сплав АК10М2Н; б – сплав АК10М2Н при режиме обработки 1; в – сплав АК10М2Н при режиме обработки 2; г – сплав АК10М2Н при режиме обработки 3

Fig. 4. General view of the samples after uniaxial stretching to destruction:
 а – the initial alloy AK10M2N; б – alloy AK10M2N in the processing mode 1; в – alloy AK10M2N in the processing mode 2; г – alloy AK10M2N in the processing mode 3

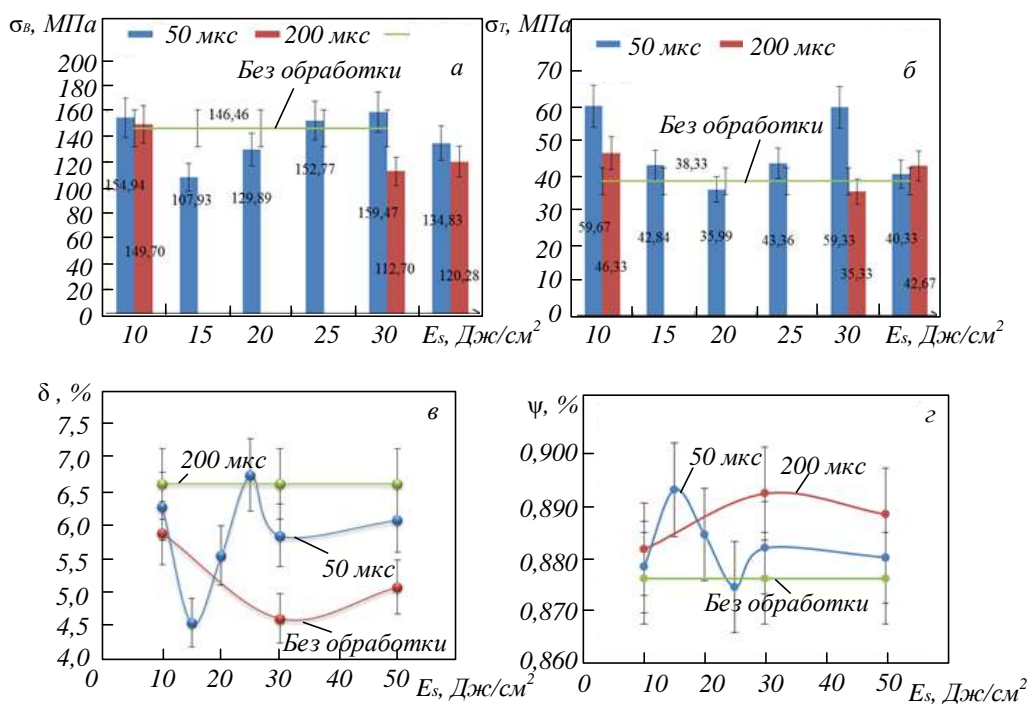


Рис. 5. Зависимости средних пределов прочности (а) и текучести (б), относительного остаточного удлинения (в) и сужения (г) при разрыве от плотности энергии пучка электронов при длительности импульса пучка электронов 50 и 200 мкс
 Fig. 5. Dependences of the average values of the tensile strength (a) and yield strength (б), relative residual elongation (в) and contraction (г) at rupture on the energy density of the electron beam at the pulse duration of the electron beam of 50 and 200 microseconds

Можно заметить, что облучение сплава АК10М2Н сопровождается увеличением прочностных свойств (предел прочности на разрыв независимо от плотности энергии пучка элект-

тронов увеличивается). Максимальный рост предела прочности наблюдается при режиме обработки 5а, который составляет 75 % по сравнению с пределом прочности литого сплава.

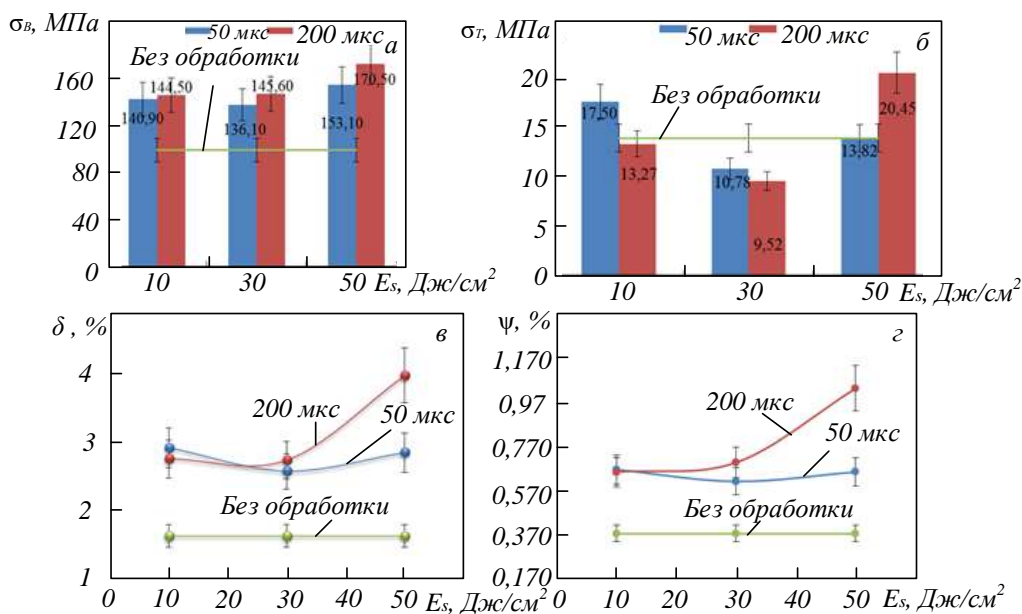


Рис. 6. Зависимости средних значений пределов прочности (а) и текучести (б), относительного остаточного удлинения (в) и сужения (г) при разрыве от плотности энергии пучка электронов при длительности импульса пучка электронов 50 и 200 мкс для сплава АК10М2Н (скорость деформирования 1,25 мм/мин)
 Fig. 6. Dependences of the average values of the tensile strength (a) and yield strength (б), relative residual elongation (в) and contraction (г) at rupture on the energy density of the electron beam at the pulse duration of the electron beam of 50 and 200 microseconds for the alloy AK10M2N (deformation rate 1.25 mm/min)

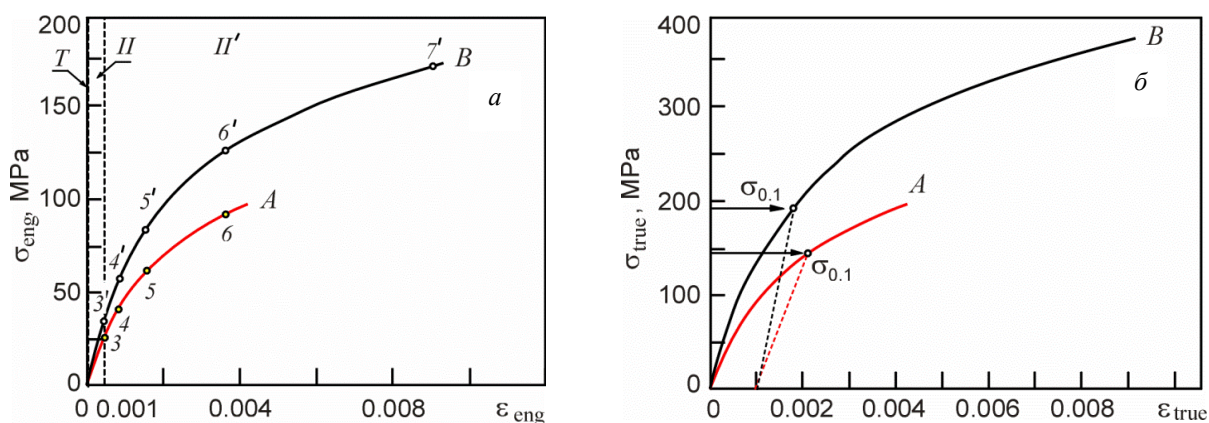


Рис. 7. Деформационные инженерные (а) и истинные (б) кривые необлученного (кривая А) и облученного (кривая В) образцов (штриховая линия выделяет на деформационной кривой стадии деформационного упрочнения материала)
 Fig. 7. Deformation engineering (a) and true (б) curves of non-irradiated (curve A) and irradiated (curve B) samples (the dashed line highlights the stages of deformation hardening of the material)

Одновременно с увеличением предела прочности на разрыв увеличиваются пластические характеристики, а именно относительное остаточное удлинение (рис. 6, в) и сужение (рис. 6, г) при разрыве демонстрируют тенденцию к увеличению, независимо от плотности энергии пучка электронов. Максимальное увеличение пластических характеристик наблюдается для предела прочности для режима 5а (примерно 150 %).

Наиболее благоприятным режимом, приводящему к максимальному одновременному увеличению прочностных и пластических свойств сплава АК10М2Н является режим 5а.

Инженерные деформационные кривые в координатах инженерные напряжения – инженерные деформации, полученные в результате одноосной деформации растяжением образцов силумина марки АК10М2Н в необлученном и облученном (режим 5а) импульсным электронным пучком состояниях, приведены на рис. 7.

Инженерные значения напряжения и деформации определяли по следующим формулам:

$$\sigma_{eng} = \left(\frac{F}{S_0} \right); \quad (1)$$

$$\varepsilon_{eng} = \left(\frac{\Delta l}{l_0} \right), \quad (2)$$

где F – растягивающее усилие; S_0 – начальная площадь поперечного сечения образца; Δl – удлинение; l_0 – начальная длина рабочей части образца.

Истинные напряжение и деформацию определяли по следующим выражениям:

$$\sigma_{true} = \left(\frac{F}{S_0} \right) \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right); \quad (3)$$

$$\varepsilon_{true} = \ln \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right). \quad (4)$$

Деформационные кривые показывают, что при одноосной деформации растяжением исходного и облученного образцов происходит хрупкое разрушение материала. Упрочнение превалирует над разупрочнением, деформационные кривые обрываются на стадии упрочнения. О хрупком характере разрушения материала свидетельствует отсутствие на деформационных кривых стадии предразрушения.

Были определены предельные прочностные характеристики силумина марки АК10М2Н в условиях одноосного растяжения при постоянной скорости деформации 1,25 мм/мин и температуре 23 °С (рис. 7, б).

Установлено, что для необлученного силумина условный предел текучести 150 МПа, предел прочности 200 МПа, максимальная деформация до разрушения 0,43 %; для облученных сплавов получили следующие значения: условный предел текучести 195 МПа, предел прочности 370 МПа, максимальная деформация до разрушения 0,92 %.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что облучение образцов импульсным электронным пучком в 1,5 – 2,0 раза увеличивает механические характеристики силумина. Однако, облучение силумина не приводит к заметным изменениям в закономерностях поведения деформационных кривых при одноосном растяжении.

Условный предел текучести соответствует стадии неоднородной пластической деформации (рис. 7). Кроме того, на начальном этапе деформации невозможно выделить упругую стадию, на

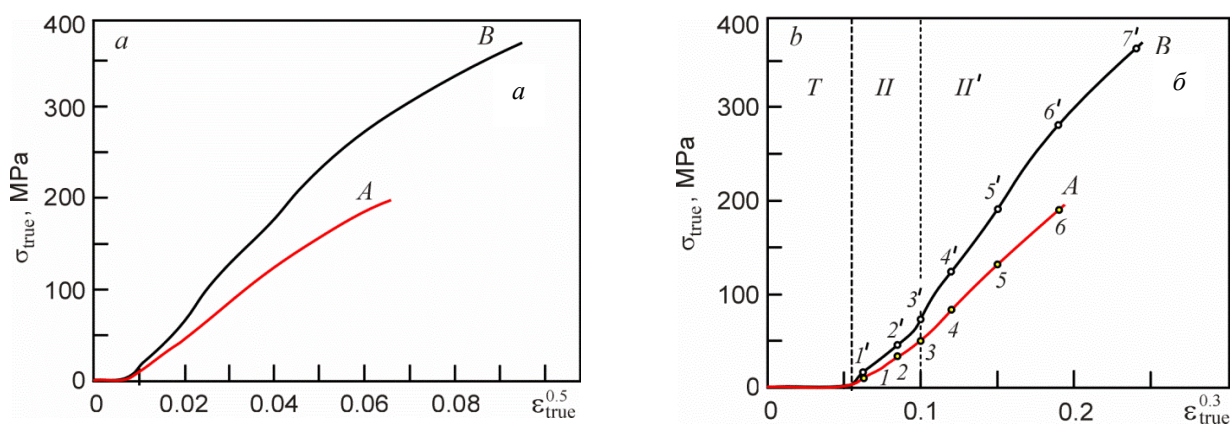


Рис. 8. Деформационные кривые необлученного (кривая A) и облученного (кривая B) образцов силумина АК10М2Н, построенные в координатах σ_{true} и $\varepsilon_{\text{true}}$ (штриховыми линиями выделены прямолинейные участки, которые характеризуют разные стадии деформационного упрочнения образца, обученного импульсным электронным пучком)

Fig. 8. Deformation curves of non-irradiated (curve A) and irradiated (curve B) samples of silumin АК10М2Н, constructed in coordinates σ_{true} and $\varepsilon_{\text{true}}$ (dashed lines indicate rectilinear sections that characterize different stages of deformation hardening of a sample trained with an im pulse electron beam)

которой выполняется закон Гука. Это связано с тем, что полученные деформационные кривые относятся к диаграммам хрупкого разрушения, так как кривые обрываются на стадии упрочнения, и только на этой стадии их можно описать параболической функциональной зависимостью вида:

$$\sigma = \sigma_0 + \Theta \varepsilon^n; \quad (5)$$

здесь σ_0 – условный предел текучести; Θ – коэффициент деформационного упрочнения; $n < 1$ – показатель деформационного упрочнения.

Для того, чтобы выделить на деформационной кривой прямолинейные участки, которые отражают стадии деформационного упрочнения с разными коэффициентами деформационного упрочнения, равного частной производной от напряжения по деформации, обработку деформационных кривых осуществляют в координатах напряжение – деформация в степени n ($0,1 < n < 1$). На рис. 8 приведены деформационные кривые в координатах истинное напряжение – истинная деформация в степени 0,5 и истинное напряжение – истинная деформация в степени 0,3. На деформационных кривых линейный характер указанных зависимостей не выявляется (рис. 8, а). Если на деформационных кривых присутствуют два прямолинейных участка (рис. 8, б), то есть можно выделить две линейные зависимости с разными коэффициентами деформационного упрочнения.

Представление деформационных кривых в координатах истинное напряжение – истинная деформация в степени 0,3 позволило выделить две стадии деформационного упрочнения силумина: это начальная переходная стадия *T* и стадия *II*. Стадию *II* можно разбить на две подстадии из-за наличия двух линейных участков с

разными углами наклона, (разными коэффициентами деформационного упрочнения в уравнении (5)). Известно, что физическая природа механизмов деформации различна в зависимости от стадии. Это находит отражение на спекл-картинах, полученных при механических испытаниях силумина.

На рис. 9, 10 представлены картины распределений деформационных полей (соответствующие состояниям в точках 3 – 6 и 3' – 7' на рис. 7, 1 – 6 и 1' – 7' на рис. 8) на поверхности необлученного и облученного образцов силумина АК10М2Н. На начальном этапе деформирования на спекл-картинах (картины 1 и 1'), которые соответствуют точкам 1 и 1' на диаграммах в координатах истинное напряжение – истинная деформация в степени 0,3, на рабочей поверхности образцов при растяжении наблюдается формирование случайно распределенных локальных очагов деформации растяжения и сжатия.

По мере роста внешнего приложенного напряжения наблюдается переход от стадии *II* к стадии *II'* деформационного упрочнения материала, что отражается на спекл-картинах (картины 2, 3). Локальные очаги деформации сжатия на распределении продольных относительных деформаций исчезают. При этом мелкие локальные области деформации очагов начинают сливаться в области большего размера в необлученных и облученных образцах. Это явление коррелирует изменением угла наклона на деформационной кривой истинное напряжение – истинная деформация в степени 0,3 (рис. 8, б) и характеризует изменение коэффициента деформационного упрочнения.

На спекл-картинах эволюция распределений поперечных относительных деформаций сопровождается образованием в центральной части

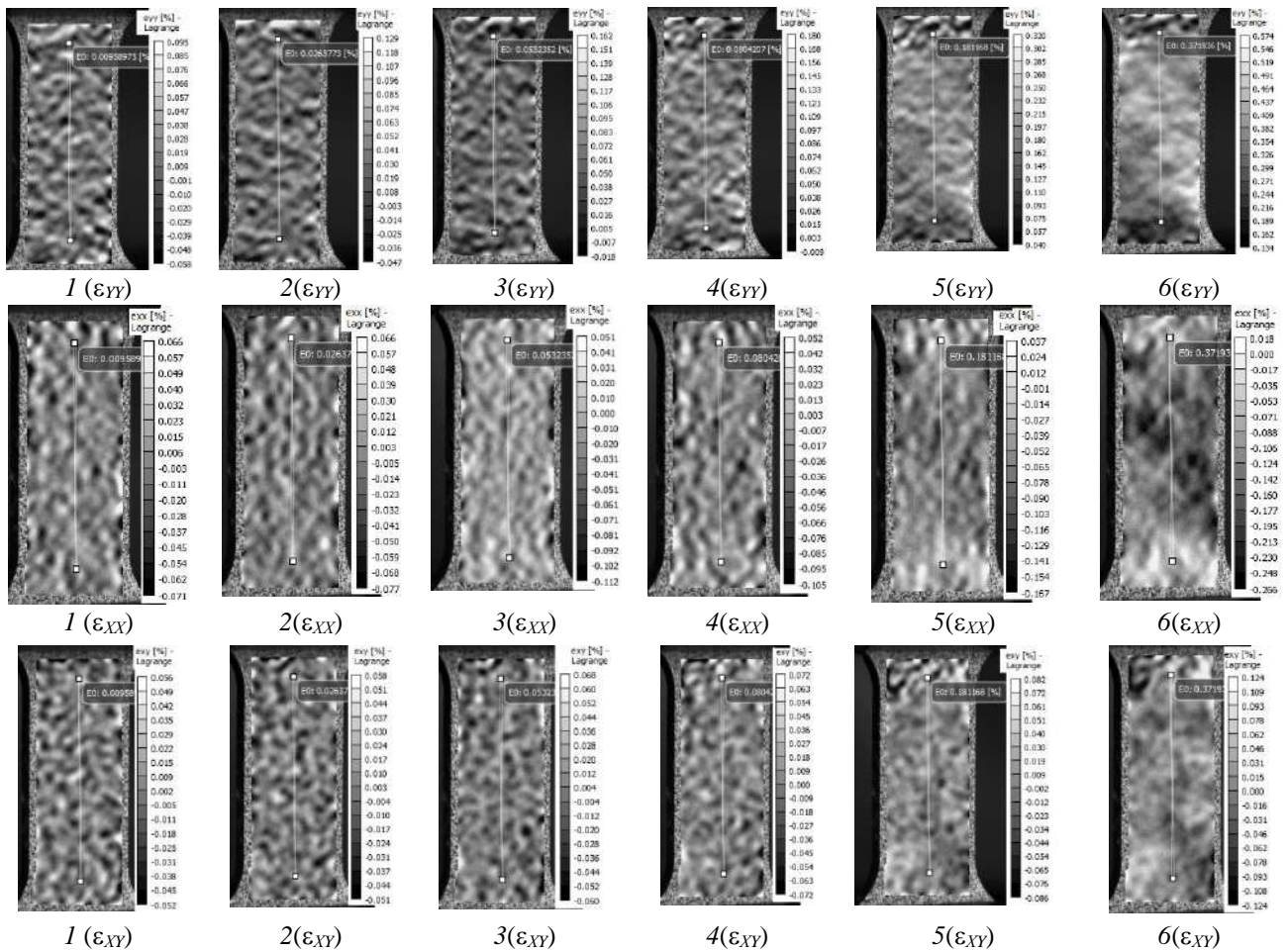


Рис. 9. Спекл-картины распределений вертикальных $\epsilon_{\gamma\gamma}$, продольных $\epsilon_{\alpha\alpha}$ и сдвиговых $\epsilon_{\alpha\gamma}$ относительных деформаций на поверхности необлученного образца при одноосном растяжении при разных усредненных деформациях по рабочему полю образцов:

1 – $\epsilon_{\gamma\gamma} = 0,00965$ %; 2 – $\epsilon_{\gamma\gamma} = 0,026$ %; 3 – $\epsilon_{\gamma\gamma} = 0,053$ %; 4 – $\epsilon_{\gamma\gamma} = 0,080$ %; 5 – $\epsilon_{\gamma\gamma} = 0,181$ %; 6 – $\epsilon_{\gamma\gamma} = 0,347$ %

Fig. 9. The speckle pattern of the distributions of vertical $\epsilon_{\gamma\gamma}$, longitudinal $\epsilon_{\alpha\alpha}$ and shear relative deformations $\epsilon_{\alpha\gamma}$ on the surface of the irradiated specimen under uniaxial tension at different average strain on the working field samples:

1 – $\epsilon_{\gamma\gamma} = 0,00965$ %; 2 – $\epsilon_{\gamma\gamma} = 0,026$ %; 3 – $\epsilon_{\gamma\gamma} = 0,053$ %; 4 – $\epsilon_{\gamma\gamma} = 0,080$ %; 5 – $\epsilon_{\gamma\gamma} = 0,181$ %; 6 – $\epsilon_{\gamma\gamma} = 0,347$ %

образца значительной по размерам вытянутой области, которая направлена под углом 45° к вертикальной оси образца. При этом на спекл-картинах распределений сдвиговых поперечных относительных деформаций наблюдается образование перед разрушением вытянутых очагов деформации вдоль оси образца (рис. 9, 2 – 6). Наблюдается образование очагов деформации со значительными деформациями на боковых гранях образца.

Изучение спекл-картин, полученных при одноосной деформации растяжением облученных образцов, позволило установить отличия в эволюции спекл-картин на поверхности необлученных образцов с ростом внешних напряжений. На распределении продольных относительных деформаций наблюдается увеличение размеров локальных очагов деформации в центральной части образца. При этом в этих очагах деформации происходит значительный рост деформации, который почти в два раза больше, чем

усредненная по всему рабочему полю образца деформация (рис. 10, 2' – 7'). При этом на спекл-картинах распределений сдвиговых поперечных относительных деформаций наблюдается образование перед разрушением вытянутых очагов деформации вдоль оси образца (рис. 10, 6' – 7'). Наблюдается образование очагов деформации со значительными деформациями на боковых гранях образцов.

Выводы

Наиболее благоприятным режимом, приводящему к максимальному одновременному увеличению прочностных и пластических свойств сплава АК10М2Н является режим 5а с параметрами ЭПО 50 Дж/см², 200 мкс. Увеличение предела прочности составляет 75 % по сравнению с пределом прочности литого сплава. Относительное остаточное удлинение и сужение при разрыве увеличивается на 150 %. Представление деформационных кривых в координатах истин-

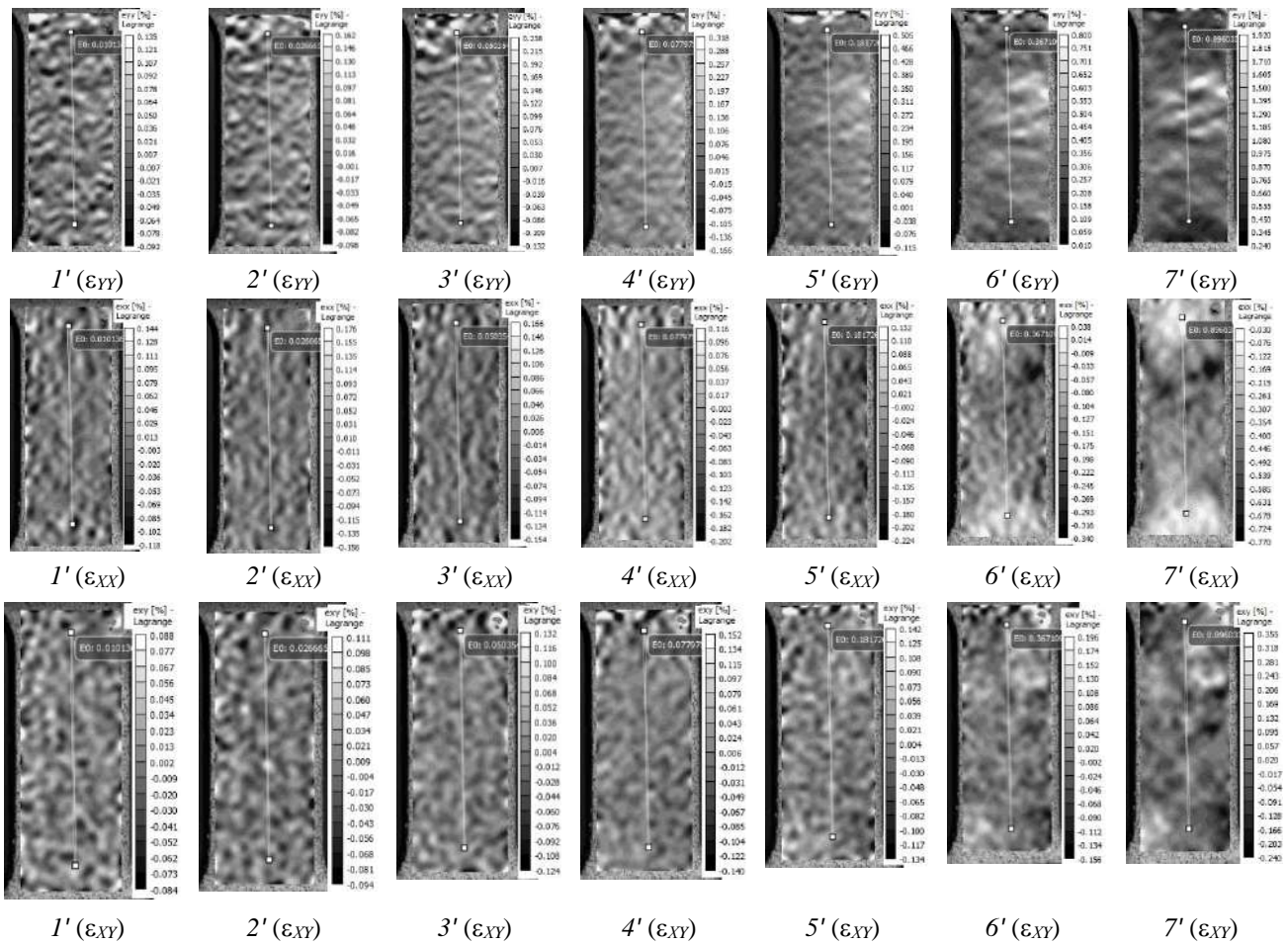


Рис. 10. Спекл-картины распределений вертикальных ϵ_{YY} , продольных ϵ_{XX} и сдвиговых ϵ_{XY} относительных деформаций на поверхности облученного образца при одноосном растяжении при разных усредненных деформациях по рабочему полю образцов:

1 – $\epsilon_{YY} = 0,01\%$; 2 – $\epsilon_{YY} = 0,026\%$; 3 – $\epsilon_{YY} = 0,050\%$; 4 – $\epsilon_{YY} = 0,078\%$; 5 – $\epsilon_{YY} = 0,181\%$; 6 – $\epsilon_{YY} = 0,367\%$; 7 – $\epsilon_{YY} = 0,896\%$

Fig. 10. Speckle patterns of distributions of vertical ϵ_{YY} , longitudinal ϵ_{XX} and shear relative deformations ϵ_{XY} on the surface of the irradiated sample under uniaxial tension with different average deformations over the working field of the samples:

1 – $\epsilon_{YY} = 0,01\%$; 2 – $\epsilon_{YY} = 0,026\%$; 3 – $\epsilon_{YY} = 0,050\%$; 4 – $\epsilon_{YY} = 0,078\%$; 5 – $\epsilon_{YY} = 0,181\%$; 6 – $\epsilon_{YY} = 0,367\%$; 7 – $\epsilon_{YY} = 0,896\%$

ное напряжение – истинная деформация в степени 0,3 позволило выделить две стадии деформационного упрочнения силумина АК10М2Н: начальная переходная стадия *T* и стадия *II*. Стадию *II* можно разбить на две подстадии из-за наличия двух линейных участков с разными углами наклона (разными коэффициентами деформационного упрочнения). Изучение спекл-картин, полученных при одноосной деформации растяжением облученных образцов, позволило установить отличия в эволюции спекл-картин на поверхности необлученных образцов с ростом внешних напряжений. На распределении продольных относительных деформаций наблюдается увеличение размеров локальных очагов деформации в центральной части образца. При этом происходит значительный рост деформации, которая почти в два раза больше, чем усредненная по всему рабочему полю образца деформация.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельский С.Е., Волчок И.П., Митяев А.А., Свидунович Н.А. Производство алюминиевых сплавов: состояние и перспективы. *Литье и металлургия*. 2006;2–1:130–133.
2. Дроздов А.А. *Алюминий. Тринадцатый элемент: энциклопедия*. Москва: Библиотека РУСАЛа. 2007:239.
3. Золоторевский В.С., Белов Н.А. *Металловедение литейных алюминиевых сплавов*. Москва: МИСиС. 2005:376.
4. Белов Н.А. *Фазовый состав алюминиевых сплавов*. Москва: ИД МИСиС. 2009:392.
5. Белов Н.А., Савченко С.В., Хван А.В. *Фазовый состав и структура силуминов*. Москва: МИСиС. 2008:282.
6. Qi M., Kang Y., Qiu Q., Tang W., Li J. Microstructures, mechanical properties, and corrosion behavior of novel high-thermal-conductivity hypoeutectic Al-Si alloys prepared by rheological high pressure die-casting

- and high pressure die-casting. *Journal of Alloys Compounds*. 2018;15(745):487–502.
7. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю. Проблема модифицирования алюминиево-кремниевой эвтектики силуминов. пути решения. *Литье и металлургия*. 2018;(2):12–15.
<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2018-2-12-15>
 8. Samat S., Omar M.Z., Baghdadi H., Mohamed I.F., Aziz A.M. Mechanical properties and microstructures of a modified Al–Si–Cu alloy prepared by thixoforming process for automotive connecting rods. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;10:1086–1102.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.085>
 9. Ласковнев А.П., Иванов Ю.Ф., Петрикова Е.А., Коваль Н.Н., Углов В.В., Черенда Н.Н., Бирик Н.В., Асташинский М.В. *Модификация структуры и свойств эвтектического силумина электронно-ионно-плазменной обработкой* / Под ред. А.П. Ласковнева. Минск: Беларус. Наука. 2013:287.
 10. Sigworth G.K. The modification of Al-Si casting alloys: important practical and theoretical aspects. *International Journal of Metalcasting*. 2008;2(2):19–40.
<https://doi.org/10.1007/BF03355425>
 11. Li Q.L., Zhao S., Li B.Q., Zhu Y.Q., Wang C.Z., Lan Y.F., Xia T.D. A novel modifier on the microstructure and mechanical properties of Al – 7Si alloys. *Materials Letters*. 2019;251:156–160.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.05.050>
 12. Lee K., Kwon Y.N., Lee S. Correlation of microstructure with mechanical properties and fracture toughness of A356 aluminum alloys fabricated by low-pressure-casting, rheocasting, and casting-forging processes. *Engineering Fracture Mechanics*. 2008;75(14):4200–4216.
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.04.004>
 13. Li Q.L., Li B.Q., Li J.B., Xia T.D., Lan Y.F., Guo T.B. Effects of the addition of Mg on the microstructure and mechanical properties of hypoeutectic Al-7%Si alloy. *International Journal of Metalcasting*. 2017;11:823–830.
<https://doi.org/10.1007/s40962-016-0131-6>
 14. Beroual S., Boumerzoug. Z., Paillard P., Borjon-Piron Y. Effects of heat treatment and addition of small amounts of Cu and Mg on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu and Al-Si-Mg cast alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;784:1026–1035.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.365>
 15. Giovanni M. Di T., Mørtzell E.A., Saito T., Akhtar S., Sabatino M. Di, Li Y., Cerri E. Di Influence of Cu addition on the heat treatment response of A356 foundry alloy. *Materials Today: Communications*. 2019;19:342–348.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.02.013>
 16. Czekaj E., Zych J., Kwak Z. , Garbacz-Klempka A. Quality Index of the AlSi7Mg0.3 Aluminium Casting Alloy Depending on the Heat Treatment Parameters. *Archives of Foundry Engineering*. 2016;16:25–28.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.02.013>
 17. Лысых С.А., Мишигдоржийн У.Л., Хареев Ю.П., Москвин П.В., Воробьев М.С., Мокеев М.А. Электронно-пучковая модификация боридных диффузионных слоев на поверхности штамповой стали 5хнм: ЗАЕТВУ. *Ползуновский ВЕСТНИК*. 2023;(2):217–224.
<https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.028>
 18. Cai J., Li Ch., Yao Y., Lyu P., Guan Q., Li Y., Lu J. Microstructural modifications and high-temperature oxidation resistance of arc ion plated NiCoCrAlYSiHf coating via high-current pulsed electron beam. *Corrosion Science*. 2021;182:109281.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109281>
 19. Lee W.J., Kim J., Park H.W. Improved corrosion resistance of Mg alloy AZ31B induced by selective evaporation of Mg using large pulsed electron beam irradiation. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019;35(5):891–901.
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.12.004>
 20. Liu Y.R., Zhang K.M., Zou J.X., Liu D.K., Zhang T.C. Effect of the high current pulsed electron beam treatment on the surface microstructure and corrosion resistance of a Mg-4Sm alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;741:65–75.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.227>
 21. Zhang T.C., Zhang K.M., Zou J.X., Yan P., Yang H.Y., Song L.X., Zhang X. Surface microstructure and property modifications in a Mg-8Gd-3Y-0.5Zr magnesium alloy treated by high current pulsed electron beam. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;788:231–239.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.02.130>
 22. Zhang X., Zhang K., Zou J., Yan P., Song L., Liu Y. Surface microstructure modifications and in-vitro corrosion resistance improvement of a WE43 Mg alloy treated by pulsed electron beams. *Vacuum*. 2020;173:109132.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.109132>

REFERENCES

1. Bel'skii S.E., Volchok I.P., Mityaev A.A., Svidunovich N.A. Production of aluminum al-

- loys: state and prospects. *Lit'e i metallurgiya*. 2006;2-1:130–133. (In Russ.).
2. Drozdov A.A. *Aluminum. The thirteenth element: an encyclopedia*. Moscow: Biblioteka RUSALa. 2007:239. (In Russ.).
 3. Zolotarevskii V.S., Belov N.A. *Metallurgy of foundry aluminum alloys*. Moscow: MISiS. 2005:376. (In Russ.).
 4. Belov N.A. *The phase composition of aluminum alloys*. Moscow: Izdatel'skii Dom MISiS. 2009:392. (In Russ.).
 5. Belov N.A., Savchenko S.V., Khvan A.V. The phase composition and structure of silumins. Moscow: MISiS. 2008:282. (In Russ.).
 6. Qi M., Kang Y., Qiu Q., Tang W., Li J. Microstructures, mechanical properties, and corrosion behavior of novel high-thermal-conductivity hypoeutectic Al-Si alloys prepared by rheological high pressure die-casting and high pressure die-casting. *Journal of Alloys Compounds*. 2018;15(745):487–502.
 7. Samat S., Omar M.Z., Baghdadi H., Mohamed I.F., Aziz A.M. Mechanical properties and microstructures of a modified Al-Si-Cu alloy prepared by thixoforming process for automotive connecting rods. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021;10:1086–1102. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.085>
 8. Laskovnev A.P., Ivanov Yu.F., Petrikova E.A., Koval' N.N., Uglov V.V., Che-renda N.N., Bibik N.V., Astashinskii M.V. *Modification of the structure and properties of eutectic silumin by electron-ion-plasma treatment* / ed. by A.P. Laskovnev. Minsk:Belarus. Nauka. 2013:287. (In Russ.).
 9. Sigworth G.K. The modification of Al-Si casting alloys: important practical and theoretical aspects. *International Journal of Metalcasting*. 2008;2(2):19–40. <https://doi.org/10.1007/BF03355425>
 10. Li Q.L., Zhao S., Li B.Q., Zhu Y.Q., Wang C.Z., Lan Y.F., Xia T.D. A novel modifier on the microstructure and mechanical properties of Al-7Si alloys. *Materials Letters*. 2019;251:156–160. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.05.050>
 11. Lee K., Kwon Y.N., Lee S. Correlation of microstructure with mechanical properties and fracture toughness of A356 aluminum alloys fabricated by low-pressure-casting, rheocasting, and casting-forging processes. *Engineering Fracture Mechanics*. 2008;75(14):4200–4216. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2008.04.004>
 12. Li Q.L., Li B.Q., Li J.B., Xia T.D., Lan Y.F., Guo T.B. Effects of the addition of Mg on the microstructure and mechanical properties of hypoeutectic Al-7% Si alloy. *International Journal of Metalcasting*. 2017;11:823–830. <https://doi.org/10.1007/s40962-016-0131-6>
 13. Beroual S., Boumerzoug. Z., Paillard P., Borjon-Piron Y. Effects of heat treatment and addition of small amounts of Cu and Mg on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu and Al-Si-Mg cast alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;784:1026–1035. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.365>
 14. Giovanni M. Di T., Mertsell E.A., Saito T., Akhtar S., Sabatino M. Di, Li Y., Cerri E. Di Influence of Cu addition on the heat treatment response of A356 foundry alloy. *Materials Today: Communications*. 2019;19:342–348. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.02.013>
 15. Czekaj E., Zych J., Kwak Z., Garbacz-Klempka A. Quality Index of the AlSi7Mg0.3 Aluminium Casting Alloy Depending on the Heat Treatment Parameters. *Archives of Foundry Engineering*. 2016;16:25–28. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.02.013>
 16. Lysykh S. A., Mishigdorzhiiin U.L., Kharaev Yu. P., Moskvina P.V., Vorob'ev M.S., Mokeev M.A. Electron beam modification of boride diffusion layers on the surface of 5khnmm die steel: ZAYTV. *Polzunovskii VESTNIK*. 2023;(2):217–224. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.028>
 17. Cai J., Li Ch., Yao Y., Lyu P., Guan Q., Li Y., Lu J. Microstructural modifications and high-temperature oxidation resistance of arc ion plated NiCoCrAlYSiHf coating via high-current pulsed electron beam. *Corrosion Science*. 2021;182:109281. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109281>
 18. Lee W.J., Kim J., Park H.W. Improved corrosion resistance of Mg alloy AZ31B induced by selective evaporation of Mg using large pulsed electron beam irradiation. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019;35(5):891–901. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.12.004>
 19. Liu Y.R., Zhang K.M., Zou J.X., Liu D.K., Zhang T.C. Effect of the high current pulsed electron beam treatment on the surface microstructure and corrosion resistance of a Mg-4Sm alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;741:65–75. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.227>
 20. Zhang T.C., Zhang K.M., Zou J.X., Yan P., Yang H.Y., Song L.X., Zhang X. Surface microstructure and property modifications in a Mg-8Gd-3Y-0.5Zr magnesium alloy treated by high current pulsed electron beam. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019;788:231–239. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.02.130>

21. Zhang X., Zhang K., Zou J., Yan P., Song L., Liu Y. Surface microstructure modifications and in-vitro corrosion resistance improvement of a WE43 Mg alloy treated by pulsed electron beams. *Vacuum*. 2020;173:109132.
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.109132>

Сведения об авторах

Анна Александровна Абатурова, старший преподаватель кафедры менеджмента качества и инноваций, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: anchutka-82@mail.ru
SPIN-код: 7760-3904

Дмитрий Валерьевич Загуляев, профессор кафедры естественнонаучных дисциплин им. В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru
Spin-код: 9522-4745

Анна Александровна Серебрякова, аспирант кафедры естественнонаучных дисциплин имени профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: aserebrakova87@gmail.com
SPIN-код: 5889-2235

Information about the authors

Anna A. Abaturova, Senior Lecturer, Department of Quality Management and Innovation, Siberian State Industrial University
E-mail: anchutka-82@mail.ru
SPIN-код: 7760-3904

Dmitrii V. Zagulyaev, Doctor of Technical Sciences, professor of the department of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
E-mail: zagulyaev_dv@physics.sibsiu.ru
Spin-код: 9522-4745

Anna A. Serebryakova, Postgraduate student of the Department of Natural Sciences named after Professor V.M. Finkel, Siberian State Industrial University
E-mail: aserebrakova87@gmail.com
SPIN-код: 5889-2235

Поступила в редакцию 16.02.2024
После доработки 28.02.2024
Принята к публикации 01.03.2024

Received 16.02.2024
Revised 28.02.2024
Accepted 01.03.2024

Краткое сообщение

УДК 621.92

DOI 10.57070/2307-4497-2024-1(47)-81-85

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПА ВЫДАЧИ СЛЯБОВ И ЗАГОТОВОК НА НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ И УГАР МЕТАЛЛА ПРИ НАГРЕВЕ В МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

© 2024 г. О. В. Кузнецова, М. В. Темлянцев, Е. Н. Темлянцева, Е. М. Запольская

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

Аннотация. В работе проведен анализ факторов, влияющих на неравномерность нагрева металла в методических печах. Особое внимание уделено исследованию влияния неравномерности темпа выдачи стальных слябов и заготовок из методических нагревательных печей на их тепловое состояние и потери с угаром. В качестве инструмента для исследований использована разработанная ранее детерминированная математическая модель, позволяющая определять динамику теплового состояния и угар металла при нагреве в методических печах. Для решения поставленной задачи модель модернизирована, ее функционал расширен с целью учета неравномерности перемещения нагреваемого металла в печи. Установлено, что при относительно не высоком влиянии неравномерности темпа выдачи на конечное тепловое состояние слябов угар может меняться в 1,5 раза, что обусловлено влиянием температурно-временного фактора.

Ключевые слова: методическая печь, слябы, нагрев металла, температурно-временные факторы

Для цитирования: Кузнецова О.В., Темлянцев М.В., Темлянцева Е.Н., Запольская Е.М. Исследование влияния темпа выдачи слябов и заготовок на неравномерность теплового состояния и угар металла при нагреве в методических печах. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):81–85. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(47\)-81-85](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(47)-81-85)

Short report

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE RATE OF ISSUANCE OF SLABS AND BLANKS ON THE UNEVENNESS OF THE THERMAL STATE AND METAL CARBON MONOXIDE DURING HEATING IN METHODOICAL FURNACES

© 2024 O. V. Kuznetsova, M. V. Temlyantsev, E. N. Temlyantseva, E. M. Zapol'skaya

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

Abstract. The paper analyzes the factors influencing the uneven heating of metal in methodical furnaces. Special attention is paid to the study of the influence of the uneven rate of delivery of steel slabs and blanks from methodical heating furnaces on their thermal condition and losses with carbon monoxide. A previously developed deterministic mathematical model was used as a research tool to determine the dynamics of the thermal state and metal carbon monoxide during heating in methodical furnaces. To solve this problem, the model has been modernized, its functionality has been expanded in order to take into account the uneven movement of the heated metal in the furnace. It was found that with a relatively low effect of the uneven rate of discharge on the final thermal state of the slabs, carbon monoxide can change by 1.5 times, due to the influence of the temperature-time factor.

Keywords: methodical furnace, slabs, metal heating, temperature and time factors

For citation: Kuznetsova O.V., Temlyantsev M.V., Temlyantseva E.N., Zapol'skaya E.M. Investigation of the effect of the rate of issuance of slabs and blanks on the unevenness of the thermal state and metal carbon monoxide during heating in methodical furnaces. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):81–85. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(47\)-81-85](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(47)-81-85)

Для нагрева непрерывнолитых заготовок, слябов и блюмов перед прокаткой наиболее широкое распространение получили методические печи различных конструкций [1; 2]. Одним из наиболее важных показателей качества нагрева металла является равномерность нагрева, которая характеризуется разностью температур (неравномерностью температурного поля) по сечению и по периметру непрерывнолитых заготовок блюмов или слябов [3]. Часто неравномерность характеризуют перепадом температур по толщине, длине и периметру.

В качестве основных первопричин неравномерности нагрева можно выделить основные факторы, связанные с:

- нагреваемым металлом (теплофизические свойства стали и влияние на них температуры, геометрические размеры и форма блюмов или слябов, в первую очередь углов (радиус закругления, наличие острых углов и т.п.));

- системой теплогенерации (равномерность интенсивности внешнего теплообмена, которая обусловлена работой топливосжигающих устройств, применяемым топливом, гидравлическим режимом работы печи) [4];

- конструкцией футеровки и геометрией рабочего пространства печи;

- системой транспортирования металла через печь (толкательного типа, шагающий под, шагающие балки) и шагом раскладки заготовок [5; 6];

- технологией производства, в частности необходимым темпом выдачи металла из печи.

Последний фактор заслуживает отдельного внимания. Поскольку традиционно для осу-

ществления инженерных расчетов и математического моделирования считают, что металл в методической печи перемещается равномерно, печь работает с постоянной производительностью, а время нагрева заготовок соответствующего сечения и марки стали одинаково [3; 7 – 10]. В условиях реального производства выдача металла из печи синхронизирована с работой прокатного стана. При этом необходимо учитывать, что в методических печах перемещение металла осуществляется дискретно толкателем, имеющим определенный цикл толкания, или механизмом шагающих балок или пода, который характеризуется определенным циклом шага. Для реальных производственных условий характерны остановки стана, которые сопровождаются остановками транспортирования металла через печь.

В рамках настоящей работы проведена модернизация математической модели [3; 11; 12] на предмет учета неравномерности перемещения металла в методической печи. Для примера демонстрации работы модернизированной математической модели использован вариант нагрева [13; 14] слябов толщиной 0,25 м из стали марки ст2пс в методической печи длиной 50,4 м с шагающими балками одного из металлургических предприятий России. Температура погрузки металла 20 °С; конечная температура нагрева 1200 °С.

Темп неравномерного перемещения слябов в методической печи представлен на рис. 1. Общая продолжительность нагрева составляет 217 мин. При таком неравномерном перемещении время нахождения металла в различных

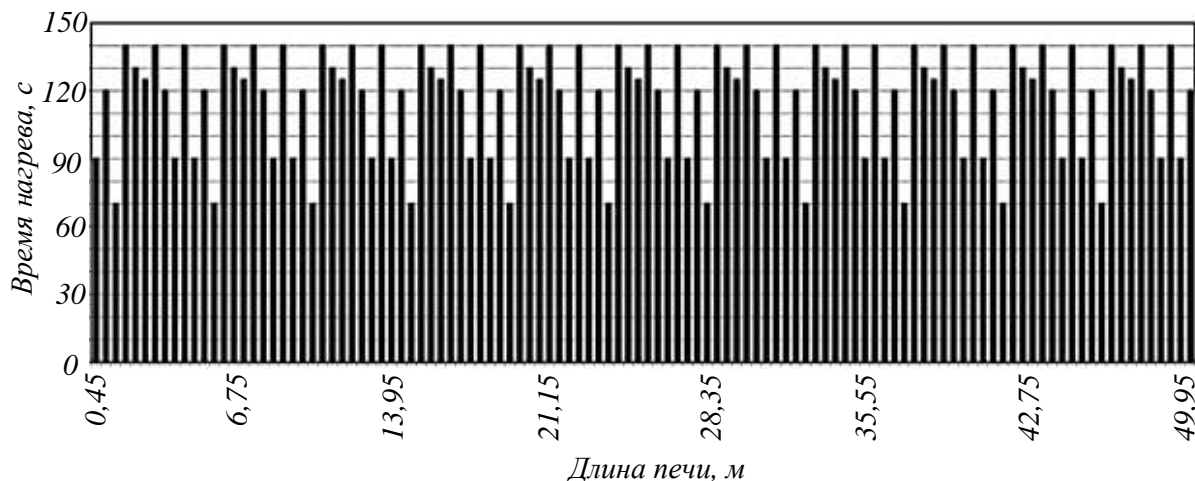


Рис. 1. Графики неравномерного темпа перемещения слябов в методической печи
Fig. 1. Graphs of the uneven rate of movement of slabs in a methodical furnace

участках печи меняется в 2 раза (от 70 до 140 с). При аналогичном нагреве, но с равномерным перемещением металла по печи, время нахождения слябов на различных участках одинаково и составляет 116,25 с.

Из анализа результатов математического моделирования следует, что при исследуемых параметрах нагрева и одинаковой суммарной продолжительности нахождения металла в печи температуры нижней, верхней поверхностей и центра слябов при равномерном и неравномерном темпе перемещения отличаются максимум на $-11 \div +20$ °С. Конечное тепловое состояние слябов на выдаче из печи фактически одинаковое, различие температур составляет не более 1 – 2 °С.

Для оценки влияния неравномерности темпа перемещения на угар металла в печи [15; 16] проанализировали два дополнительных режима нагрева (рис. 2). Угар рассчитывали по соотношениям, представленным в работах [11; 17]. Режим 2 характеризуется тем, что от посадки до середины печи слябы перемещаются циклами продолжительностью 70 с, а далее до выдачи через 162,5 с. Для режима 3 от посадки до середины печи слябы перемещаются циклами через 162,5 с, а далее до выдачи через 70 с. По рассчитанному тепловому состоянию слябов определили угар металла при нагреве. Для условий темпа перемещения соответствующему рис. 1 потери металла составили 0,173 г/см², для режимов 2 и 3 0,194 и 0,133 г/см². Более высокий угар для режима 2 обоснован тем, что при такой неравномерности темпа перемещения металла его поверхность находится большее время при более высокой температуре, чем при других сравниваемых режимах. Это подтверждается тем, что при режиме

2 поверхность слябов достигает температуры в 800 °С (интенсификации угара) уже на 80 мин нагрева, а при режиме 3 только на 105 мин.

Выводы

Проведенные исследования показывают, что неравномерность темпа выдачи металла из методических нагревательных печей, вызванная технологическими факторами, оказывает влияние на конечное состояние металла и экономичность нагрева, обусловленную потерями металла от угара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусовский В.Л., Ладыгичев М.Г., Усачев А.Б. *Современные нагревательные и термические печи (конструкции и технические характеристики)* / Под ред. А.Б. Усачева. Москва: Теплотехник. 2007:656.
2. Кривандин В.А., Егоров А.В. *Тепловая работа и конструкции печей черной металлургии*. Москва: Металлургия. 1989:462.
3. Перетятыко В.Н., Темлянцев Н.В., Темлянцев М.В., Михайленко Ю.Е. *Нагрев стальных слябов*. Москва: Теплотехник. 2008:192.
4. Yan A., Chai T., Wu F., Wang P. Hybrid intelligent control of combustion process for ore-roasting furnace. *Journal of Control Theory and Applications*. 2008;6(1):80–85.
5. Кузнецова О.В., Коноз К.С., Темлянцев М.В., Темлянцев Н.В. Исследование влияния неравномерности нагрева заготовок в методических печах с механизированным подом на угар металла. В кн.: *Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве. Сборник докладов VI Всероссийской научно-практической конференции*

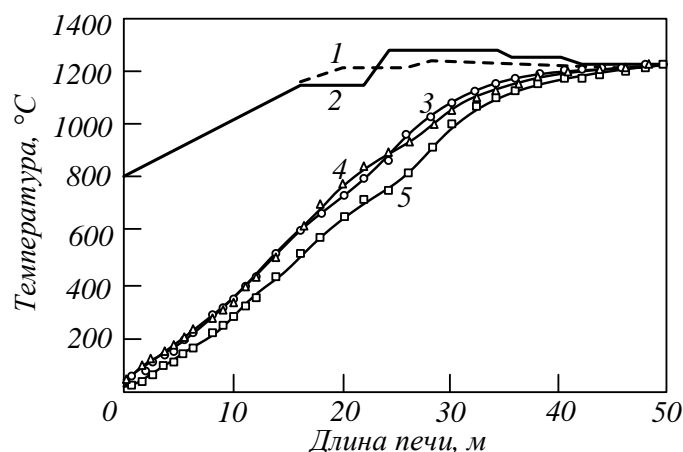


Рис. 2. Температурный режим нагрева слябов в методической печи:

1 и 2 – температуры нижних и верхних камер печи; 3 – 5 – температура верхней, нижней поверхностей и центра слябов (линии – равномерное перемещение, точки – неравномерное)

Fig. 2. The temperature regime of heating slabs in a methodical furnace:

1 and 2 – the temperatures of the lower and upper chambers of the furnace; 3 – 5 – the temperature of the upper, lower surfaces and the center of the slabs (lines – uniform movement, points – uneven)

- студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2017) с международным участием. Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. 2017:62–66. EDN: ZSTQMT.
6. German M.L. Optimization of temperature regimes of walking-beam heating furnaces. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2006;79(4):736–740. <http://dx.doi.org/10.1007/s10891-006-0159-1>
 7. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. Москва: Металлургия. 1990:239. EDN: VJQRUM.
 8. Соколов А.К. Совершенствование и оптимизация нагрева металла в газовых печах методом математического моделирования. Иваново: ИГЭУ. 2012:255. EDN: OWFPWM.
 9. Ревун М.П., Соколов А.К. Моделирование нагрева металла при автоматизированном проектировании и управлении. Запорожье: ЗГИА. 2000:351. EDN: GNXPYN.
 10. Li G.-J., Li X.-T., Chen H.-G. The simplified method to calculate two-dimensional heat conduction equations of heating slab. *Applied Mechanics and Materials*. 2011;79:105–110. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.79.105>
 11. Темлянцев М.В., Михайленко Ю.Е. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением. Москва: Теплотехник. 2006:200.
 12. Павлов В.В., Темлянцев М.В., Корнева Л.В., Сюсюкин А.Ю. Перспективные технологии тепловой и термической обработки в производстве рельсов. Москва: Теплотехник. 2007:279. EDN: QMZWVN.
 13. Кузнецова О.В., Темлянцев М.В., Темлянцева Е.Н., Уманский А.А., Скопич Д.В., Фатьянова Е.А. Исследование влияния неравномерности перемещения слябов и заготовок в методических печах на тепловое состояние металла. *Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение*. 2018;21:100–108. EDN: YPWXUL.
 14. Кузнецова О.В., Темлянцев М.В., Темлянцева Е.Н. К вопросу об учете неравномерности перемещения заготовок при математическом моделировании процессов нагрева металла в методических печах. *Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии*. 2018;40:49–53.
 15. Кузнецова О.В., Коноз К.С., Темлянцев М.В., Темлянцев Н.В. Исследование влияния неравномерности нагрева заготовок в методических печах на процессы окиснообразования. В кн.: *Кузбасс: образование, наука, инновации. Материалы Инновационного конвента*. 2017. С. 403–406.
 16. Jang J.H., Lee D.E., Kim M.Y., Kim H.G. Investigation of the slab heating characteristics in a reheating furnace with the formation and growth of scale on the slab surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010;53:4326–4332. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2010.05.061>
 17. Филиппова М.В., Перетятко В.Н., Темлянцев М.В. Разработка и внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий обработки металлов давлением. Новосибирск: СО РАН. 2016:269. EDN: VWWFLN.

REFERENCES

1. Gusovskii V.L., Ladygichev M.G., Usachev A.B. *Modern heating and thermal furnaces (designs and technical characteristics)* / A.B. Usachev ed. Moscow: Teplotekhnik. 2007:656. (In Russ.).
2. Krivandin V.A., Egorov A.V. *Thermal operation and designs of furnaces of ferrous metallurgy*. Moscow: Metallurgiya. 1989:462. (In Russ.).
3. Peretyat'ko V.N., Temlyantsev N.V., Temlyantsev M.V., Mikhailenko Yu.E. *Heating of steel slabs*. Moscow: Teplotekhnik. 2008:192. (In Russ.).
4. Yan A., Chai T., Wu F., Wang P. Hybrid intelligent control of combustion process for ore-roasting furnace. *Journal of Control Theory and Applications*. 2008;6(1):80–85.
5. Kuznetsova O.V., Konoz K.S., Temlyantsev M.V., Temlyantsev N.V. Investigation of the effect of uneven heating of workpieces in methodical furnaces with mechanized hearth on metal carbon monoxide. In: *Heat engineering and Computer science in education, science and production. Collection of reports of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, postgraduates and Young Scientists (TIM'2017) with international participation*. Ekaterinburg: Ural'skii federal'nyi universitet imeni pervogo Prezidenta Rossii B.N. El'tsina. 2017:62–66. EDN: ZSTQMT. (In Russ.).
6. German M.L. Optimization of temperature regimes of walking-beam heating furnaces. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2006;79(4):736–740. <http://dx.doi.org/10.1007/s10891-006-0159-1>
7. Arutyunov V.A., Bukhmirov V.V., Krupennikov S.A. Mathematical modeling of the thermal operation of industrial furnaces. Moscow: Metallurgiya. 1990:239. EDN: VJQRUM. (In Russ.).

8. Sokolov A.K. *Improvement and optimization of metal heating in gas furnaces by mathematical modeling*. Ivanovo: IGEU. 2012:255. EDN: OWFPWM. (In Russ.).
9. Revun M.P., Sokolov A.K. Modeling of metal heating in computer-aided design and management. Zaporozhye: ZGIA. 2000:351. EDN: GNXPYN. (In Russ.).
10. Li G.-J., Li X.-T., Chen H.-G. The simplified method to calculate two-dimensional heat conduction equations of heating slab. *Applied Mechanics and Materials*. 2011;79:105–110. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.79.105>
11. Temlyantsev M.V., Mikhailenko Yu.E. *Oxidation and decarbonization of steel in the processes of heating under pressure treatment*. Moscow: Teplotekhnik. 2006:200. (In Russ.).
12. Pavlov V.V., Temlyantsev M.V., Korneva L.V., Syusyukin A.Yu. *Promising technologies of thermal and heat treatment in the production of rails*. Moscow: Teplotekhnik. 2007:279. EDN: QMZWVN. (In Russ.).
13. Kuznetsova O.V., Temlyantsev M.V., Temlyantseva E.N., Umanskii A.A., Skopich D.V., Fat'yanova E.A. Investigation of the effect of uneven movement of slabs and workpieces in methodical furnaces on the thermal state of the metal. *Vestnik Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Zapadno-Sibirskoe otdelenie*. 2018;21:100–108. EDN: YPWXUL. (In Russ.).
14. Kuznetsova O.V., Temlyantsev M.V., Temlyantseva E.N. On the issue of taking into account the uneven movement of workpieces in the mathematical modeling of metal heating processes in methodical furnaces. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sektsii Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Otdelenie metallurgii*. 2018;40:49–53. (In Russ.).
15. Kuznetsova O.V., Konoz K.S., Temlyantsev M.V., Temlyantsev N.V. Investigation of the effect of uneven heating of workpieces in methodical furnaces on the processes of scale formation. In: *Kuzbass: education, science, innovation. Materials of the Innovation Convention*. 2017:403–406. (In Russ.).
16. Jang J.H., Lee D.E., Kim M.Y., Kim H.G. Investigation of the slab heating characteristics in a reheating furnace with the formation and growth of scale on the slab surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010;53:4326–4332. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2010.05.061>
17. Filippova M.V., Peretyat'ko V.N., Temlyantsev M.V. *Development and implementation of energy- and resource-saving technologies for metal forming*.

Novosibirsk: SO RAN. 2016:269. EDN: VWWFLN. (In Russ.).

Сведения об авторах

Ольга Владимировна Кузнецова, магистрант, Сибирский государственный индустриальный университет

Михаил Викторович Темлянец, д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0001-7985-5666

SPIN-код: 6169-5458

Елена Николаевна Темлянцева, к.т.н., доцент, и.о. заведующего кафедрой теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru

SPIN-код: 9096-4256

Екатерина Михайловна Запольская, преподаватель кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: beloglazova-ekat@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8098-5895

SPIN-код: 7302-2751

Information about the authors

Olga V. Kuznetsova, undergraduate student, Siberian State Industrial University

Mikhail V. Temlyantsev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University

E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0001-7985-5666

SPIN-код: 6169-5458

Elena N. Temlyantseva, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Acting Head of the Chair “Thermal Power and Ecology”, Siberian State Industrial University

E-mail: elena.temlyantseva@yandex.ru

ORCID:

SPIN-код: 9096-4256

Ekaterina M. Zapol'skaya, Lecturer of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University

E-mail: beloglazova-ekat@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8098-5895

SPIN-код: 7302-2751

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 26.02.2024

После доработки 04.03.2024

Принята к публикации 06.03.2024

Received 26.02.2024

Revised 04.03.2024

Accepted 06.03.2024

Оригинальная статья

УДК 621.92

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-86-91

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ОДНОВАЛКОВКА ДРОБИЛКА, ПРЕДНАЗНАЧЕННАЯ
ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СЫРЬЯ К МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМУ ПЕРЕДЕЛУ**

© 2024 г. А. Г. Никитин, Ю. А. Епифанцев, Н. М. Курочкин

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

Аннотация. В металлургической промышленности примерно 40 % энергии, затрачиваемой на подготовку сырья для дальнейшего передела, приходится на процессы дробления, которые осуществляются на дробильных машинах. Эти процессы необходимы для получения кусков сырья необходимой фракции для проведения металлургических процессов. Одним из основных показателей процесса дробления является эффективность дробления, которая определяется массой дробленого материала, получаемой при расходовании единицы электроэнергии. Очевидно, что снижение энергопотребления при дроблении является актуальной проблемой, решение которой повышает показатель энергоэффективности работы дробилок. Минимальный расход энергии, необходимый для разрушения хрупкого материала, будет в том случае, если в дробимом куске генерируются только касательные напряжения. Предел прочности при их действии в два раза меньше, чем при возникновении в куске нормальных напряжений при прочих равных условиях (одинаковом размере и материале). С целью уменьшения расхода энергии, требуемой для разрушения хрупкого материала, следует обеспечить в дробимом куске генерацию исключительно касательных напряжений. В Сибирском государственном индустриальном университете спроектирована одновалковая дробилка, конструкция рабочих органов которой способна генерировать в исходном разрушаемом куске сдвиговые деформации, при которых возникают только касательные напряжения. Это происходит за счет того, что в процессе работы дробилки разрушение перерабатываемого материала происходит за счет сил, действующих на дробимый кусок в одной плоскости навстречу друг другу. Проведенный силовой анализ работы одновалковой дробилки, работающей на сдвиг, показал, что выполняется условие создания в разрушаемом куске плоского напряженного состояния (возникают только касательные напряжения). За счет этого происходит уменьшение расхода энергии на дробление примерно в два раза по сравнению с щековыми дробилками, которые работают на сжатие.

Ключевые слова: дробилка, энергоэффективность, силовой анализ, хрупкий материал, напряжение, деформация, сдвиг

Для цитирования: Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Курочкин Н.М. Структурно-фазовые состояния и свойства плазменной наплавки быстрорежущей стали в среде азота. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):86–91. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-86-91](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-86-91)

Original article

**ENERGY-EFFICIENT SINGLE-ROLL CRUSHER DESIGNED FOR THE
PREPARATION OF RAW MATERIALS FOR METALLURGICAL PROCESSING**

© 2024 A. G. Nikitin, Yu. A. Epifantsev, N. M. Kurochkin

Siberian State Industrial University (Russia, 654007, Kemerovo region – Kuzbass, Novokuznetsk, Kirova str., 42)

Abstract. In the metallurgical industry, approximately 40 % of the energy spent on preparing raw materials for further processing is accounted for by crushing processes that are carried out on crushing machines. These processes are necessary to obtain pieces of raw materials of the required fraction for metallurgical processes. One of the main indicators of the crushing process is the crushing efficiency, which is determined by the mass of crushed material

obtained by consuming a unit of electricity. Obviously, reducing energy consumption during crushing is an urgent problem, the solution of which increases the energy efficiency of the crushers. The minimum energy consumption required to destroy a brittle material will be if only tangential stresses are generated in the crushed piece. The tensile strength under their action is two times less than when normal stresses occur in a piece, all other things being equal (the same size and material). In order to reduce the energy consumption required for the destruction of brittle material, it is necessary to ensure the generation of exclusively tangential stresses in the crushed piece. A single-roll crusher has been designed at the Siberian State Industrial University, the design of the working bodies of which is capable of generating shear deformations in the initial destructible piece, in which only tangential stresses occur. This is due to the fact that during the operation of the crusher, the destruction of the processed material occurs due to forces acting on the crushed piece in the same plane towards each other. The conducted force analysis of the operation of a single-roll crusher operating on a shear showed that the condition for creating a flat stress state in the destroyed piece is fulfilled (only tangential stresses occur). Due to this, the energy consumption for crushing is reduced by about two times compared to jaw crushers that operate on compression.

Keywords: crusher, force analysis, energy efficiency, brittle material, stress, deformation, shear

For citation: Nikitin A.G., Epifantsev Yu.A., Kurochkin N.M. Structural-phase states and properties of plasma surfacing with high-speed steel in a nitrogen medium. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):86–91. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-86-91](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-86-91)

Введение

В металлургической промышленности примерно 40 % энергии, затрачиваемой на подготовку сырья для дальнейшего передела, приходится на процессы дробления, при этом потребность в переработанном сырье увеличивается ежегодно на 7 % [1; 2]. Эти процессы направлены на получения кусков сырья необходимой фракции для металлургических процессов. Куски сырья заданной фракции получают на дробилках различных конструкций (щековых [3 – 6], валковых [7 – 10] и конусных [11 – 13]), которые работают на сжатие. В них разрушение кусков происходит под действием нормальных напряжений. Такой способ дробления является наиболее энергоемким [14 – 16].

Очевидно, что снижение энергопотребления при дроблении является актуальной проблемой, решение которой повышает показатель энергоэффективности работы дробилок [12; 13].

Минимальный расход энергии, необходимой для разрушения хрупкого материала, будет в том случае, если в дробимом куске генерируются только касательные напряжения, так как предел прочности при их действии в два раза меньше, чем при возникновении в куске нормальных напряжений при прочих равных условиях (одинаковом размере и материале) [14]. С целью уменьшения расхода энергии, требуемой для разрушения хрупкого материала, следует обеспечить в дробимом куске генерацию исключительно касательных напряжений.

Объект исследования

В процессе работы любой машины, в том числе и дробильной, возникают силы, действующие на объект обработки с целью выполнения

технологической операции, расчет величины которых необходим для определения мощности привода машины. Силовой анализ рабочего процесса является неотъемлемым этапом проектирования машины.

В Сибирском государственном индустриальном университете спроектирована одновалковая дробилка, конструкция рабочих органов которой способна генерировать в исходном разрушаемом куске сдвиговые деформации, при которых возникают только касательные напряжения. Это происходит за счет того, что в процессе работы дробилки разрушение перерабатываемого материала происходит за счет сил, действующих на дробимый кусок в одной плоскости навстречу друг другу. Такой способ разрушения хрупких материалов обеспечивает снижение потребления энергии примерно в два раза по сравнению с дробилками, работающими на сжатие.

В связи с тем, что конструкция одновалковой дробилки, работающей на сдвиг, имеет существенные отличия от известных схем дробильных машин, необходимо провести анализ ее работы и процесса дробления хрупких материалов.

Конструкция одновалковой дробилки, в которой происходит процесс генерации в исходном разрушаемом куске сдвиговых деформаций, при которых возникают только касательные напряжения, должна удовлетворять следующим условиям: на валке установлены упоры одинаковой высоты, при этом их высота равна величине требуемой фракции готового продукта; зазор между валком и нижней кромкой выходного отверстия тетки соответствует высоте упора; размер выходного отверстия тетки соответствует величине загружаемого дробимого куска.

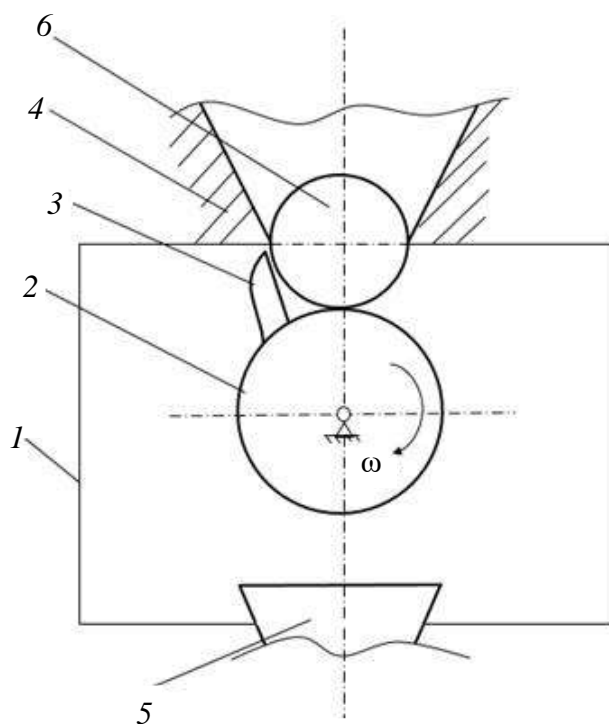


Рис. 1. Схема одновалковой дробилки, работающей на сдвиг:

1 – корпус дробилки; 2 – приводной валок; 3 – ребро;
4 – течка; 5 – разгрузочная воронка; 6 – дробимый кусок
Fig. 1. Diagram of a single-roll crusher operating on a shear:
1 – crusher body; 2 – drive roll; 3 – rib; 4 – flow;
5 – discharge funnel; 6 – crushed piece

Дробилка (рис. 1) состоит из корпуса 1, в котором установлен в радиальных подшипниках приводной валок 2. Валок приводится во вращение электродвигателем через муфту и клиноременную передачу, передающую вращение валку. Валок оснащен упорами 3, закрепленными на его поверхностях, при этом рабочая поверхность упоров совпадает с радиальной линией валка. Высота упоров должна быть одинаковой и равна зазору между наружной поверхностью валка и нижней кромкой выходного отверстия течки, чтобы обеспечить генерацию в исходном разрушаемом куске сдвиговую деформацию. В верхней части корпуса имеется течка 4 для подачи материала, при этом ось течки совпадает с вертикальной осью валка. Нижняя кромка течки не должна касаться верхней части упора, установленного на валке. В нижней части корпуса расположена разгрузочная воронка 5.

Дробление происходит следующим образом. Куски дробимого материала 6 через течку один за другим подаются в зону дробления, образованную внешней поверхностью валка, рабочей поверхностью упора и нижней кромкой выходного отверстия течки.

При вращении валка упоры, расположенные на поверхностях валка, периодически образуют зазор между нижней кромкой выходного отверстия течки и внешней поверхностью валка, раз-

мер которого больше размера куска, в который проваливается кусок и опирается на кромку течки, находящейся со стороны, противоположной направлению вращения валка. Во время вращения валка упор рабочей поверхностью прижимает кусок к нижней кромке течки. За счет возникновения в нем касательных напряжений развивается деформация сдвига и кусок разрушается. В результате разрушения исходного куска образуется фрагмент заданной фракции.

Один из фрагментов, который находится в кармане,двигающимся в сторону вращения валка, проваливается в разгрузочную воронку. Оставшийся после разрушения куска в течке фрагмент падает вниз в карман, образованный поверхностью валка и расстоянием между двумя соседними упорами, а затем перемещается, опираясь на рабочую поверхность следующего упора, в сторону разгрузочной воронки.

Если оставшийся в течке фрагмент больше установленного зазора, то происходит вторичное разрушение куска и так до тех пор, пока последний фрагмент не станет меньше зазора и переместится в разгрузочную воронку. После чего подается следующий исходный кусок.

В зависимости от заданного гранулометрического состава исходного продукта и требуемого размера фракции конечного устанавливается необходимый зазор между валком, на котором крепятся сменные упоры соответствующей высоты, и нижней кромкой выходного отверстия течки, а также меняется течка соответствующего размера.

Целью силового анализа является определение закона распределения сил, действующих на дробимые куски, в процессе дробления и связанного с этим вида напряженного состояния, возникающего в кусках, которое определяет характер их разрушения.

Так как форма куска не влияет на величину и направление сил, действующих на кусок со стороны рабочего инструмента, а также на процесс дробления [20], то изучение силового анализа следует проводить на куске, имеющем правильную форму (кубическую или сферическую). В дальнейшем принимается сферическая форма.

При попадании куска в зону дробления он находится в контакте одной стороной с нижней кромкой течки, находящейся со стороны, противоположной направлению вращения валка в точке В, а другой – с вершиной упора в точке А (рис. 2).

При вращении валка кусок зажимается между вершиной рабочей поверхности упора и нижней кромкой течки, при этом возникают силы, действующие на кусок. Одна из них со стороны вершины ребра P_A направлена по касательной к траектории движения точки А, другая – со сто-

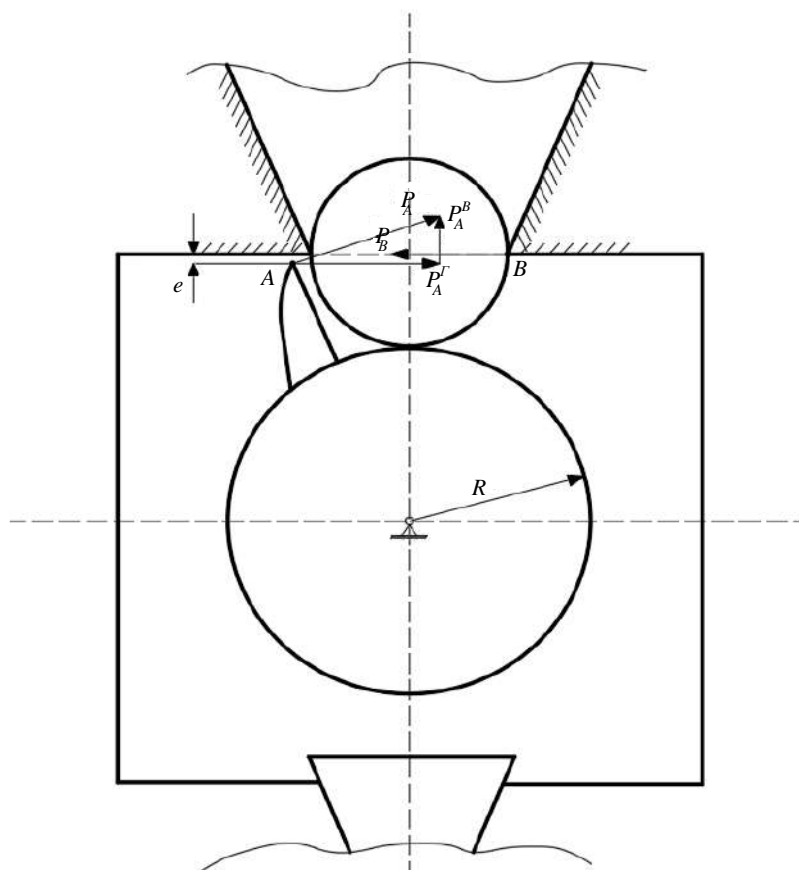


Рис. 2. Схема сил, действующих на кусок дробимого материала
Fig. 2. Diagram of forces acting on a piece of crushed material

роны нижней кромки P_B направлена от точки B по линии, соединяющей нижние кромки точки. Так как проекция силы P_A в вертикальной плоскости P_A^b значительно меньше горизонтальной составляющей P_A^r , то ей можно пренебречь. Из-за малого расстояния e , являющегося плечом пары сил P_B и горизонтальной составляющей P_A^r , создаваемый ими момент пренебрежимо мал, поэтому не оказывает влияния на схему силового воздействия на кусок.

Разрушение куска хрупкого материала происходит в результате действия в дробимом куске касательных напряжений, которые вызывают деформацию чистого сдвига. В этом случае сила, необходимая для осуществления дробления, определяется по следующей формуле:

$$P = \tau A,$$

где τ – предел прочности касательных напряжений, возникающих в дробимом куске при его разрушении; $A = \pi r^2$ – площадь поперечного сечения дробимого куска; r – радиус дробимого куска.

В одновалковой дробилке, работающей на сдвиг, в куске дробимого хрупкого материала действуют только касательные напряжения, под действием которых происходит разрушение

куска, что обеспечивает снижение потребления энергии примерно в два раза по сравнению с дробилками, работающими на сжатие.

Выводы

Разработана конструкция энергоэффективной одновалковой дробилки, предназначенной для разрушения хрупких материалов при подготовке сырья к металлургическому переделу. В рассматриваемой дробилке, работающей на сдвиг, происходит процесс генерации в исходном разрушаемом куске сдвиговых деформаций, при этом возникают только касательные напряжения. Проведенный силовой анализ работы одновалковой дробилки, работающей на сдвиг, показал, что выполняется условие создания в разрушаемом куске плоского напряженного состояния (возникают только касательные напряжения). За счет этого происходит уменьшается расход энергии на дробление примерно в два раза по сравнению с шестовыми дробилками, которые работают на сжатие.

БИБЛИГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полторацкий Л.М., Барнаев И.А. *Конкуренция черной металлургии в условиях кризисных явлений*. Новокузнецк: Полиграфист. 2009:129.

2. Jack de la Vergne. *Hard Rock Miner's Handbook*. Edmonton. Alberta, Canada: Stantec Consulting. 2008:330.
3. Legendre D. *Numerical and Experimental Optimization Analysis of a Jaw Crusher and a Bubble Column Reactor: Doctor of Technology Thesis Thermal and Flow. Engineering Laboratory. Faculty of Science and Engineering*. Abo Akademi University. Turku. Finland. 2019:78.
4. Mwangi P.N., Muvengei O.M., Mbuya T.O. Review of Discrete Element Modelling in Optimisation of Energy Consumption of a Single-Toggle Jaw Crusher. In: *Proceedings of the Sustainable Research and Innovation Conference*. 2018:251–259.
5. Pat. 105682804 US. *Jawcrushers. Sandvik intellectual property / Lindstrom Anders*. Publ. 15.06.2016.
6. Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Лактионов С.А., Витушкин А.В. Анализ факторов, влияющих на силу дробления хрупких материалов. *Известия вузов. Черная Металлургия*. 2013;56(2):30–32. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-2-30-32>; EDN: QCTWPZ.
7. Gupta A., Yan D.S. *Roll Crushers (Chapter 6), Mineral Processing Design and Operation (An Introduction)*. 2006:142–160.
8. Holger Lieberwirth, Philipp Hillmann, Max Hesse. Dynamics in double roll crushers. *Minerals Engineering*. 2017;103–104:60–66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2016.08.009>
9. Nikitin A.G., Laktionov S.A., Medvedeva K.S. Diagnosis of the rock crushing modes to increase the efficiency of one – roll crusher operation. *IOP Conference Series: Earth and Environment Science*. 2017;84:012033. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/84/1/012033>
10. Никитин А.Г., Епифанцев Ю.А., Медведева К.С., Герике П.Б. Силовой анализ процесса разрушения хрупких материалов в одновалковой дробильной машине с упором на валке. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019;62(4):303–307. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-4-303-307>; EDN: DHVFXТ.
11. Gröndahl A., Asbjörnsson G., Hulthén E., Evertsson M. Diagnostics of cone crusher feed segregation using power draw measurements. *Minerals Engineering*. 2018;127:15–21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2018.07.008>
12. Atta K.T., Euz'ebio T., Ibarra H., Silva Moreira V., Johansson A. Extension, Validation, and Simulation of a Cone Crusher Model. *IFAC-PapersOnLine*. 2019;52(14):1–6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.154>
13. Сахаров Д.Ф., Витушкин А.В. Силовой анализ процесса дробления в конусной дробильной машине. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2018;61(12):980–986. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-12-980-986>; EDN: YUONPF.
14. Масленников В.А. Дробилки, разрушающие материал сжатием. *Известия вузов. Горный журнал*. 1996;10–11:124–138.
15. Лагунова Ю.А. Дробимость хрупких материалов при разрушении их сжатием. *Известия вузов. Горный журнал*. 1996;10–11:121–124.
16. Никитин А.Г., Сахаров Д.Ф. Сравнительный анализ энергозатрат дробилок, работающих на сжатие. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2011;4:56–57.
17. Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. *Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации*. Москва: Машиностроение. 1990:320.
18. Целиков А.И. *Машины и агрегаты металлургических заводов*. Т.1. Москва: Машиностроение. 1987:440.
19. Goulet J. *Resistance des materiaux*. Bordas Paris. 1976:192 p.
20. Родин Р.А. О работе, расходуемой на дробление горных пород. *Известия вузов. Горный журнал*. 1987;6:84–89.

REFERENCES

1. Poltoratskii L.M., Barnaev I.A. *Competitiveness of ferrous metallurgy in the conditions of crisis phenomena*. Novokuznetsk: Poligrafist, 2009:129. (In Russ.).
2. Jack de la Vergne. *Hard Rock Miner's Handbook*. Edmonton. Alberta, Canada: Stantec Consulting. 2008:330.
3. Legendre D. *Numerical and Experimental Optimization Analysis of a Jaw Crusher and a Bubble Column Reactor: Doctor of Technology Thesis Thermal and Flow. Engineering Laboratory. Faculty of Science and Engineering*. Abo Akademi University. Turku. Finland. 2019:78.
4. Mwangi, P.N., Muvengei O.M., Mbuya T.O. Review of Discrete Element Modelling in Optimisation of Energy Consumption of a Single-Toggle Jaw Crusher. In: *Proceedings of the Sustainable Research and Innovation Conference*. 2018:251–259.
5. Pat. 105682804 US. *Jawcrushers. Sandvik intellectual property / Lindstrom Anders*. Publ. 15.06.2016.
6. Nikitin A.G., Yepifantzev Yu.A., Laktionov S.A., Vitushkin A.V. Analysis of factors affecting strength of fragile materials fragmentation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013;56(2):30–

32. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2013-2-30-32>; EDN: QCTWPZ.
7. Gupta A., Yan D.S. *Roll Crushers (Chapter 6)*, Mineral Processing Design and Operation (An Introduction). 2006:142–160.
 8. Holger Lieberwirth, Philipp Hillmann, Max Hesse. Dynamics in double roll crushers. *Minerals Engineering*. 2017;103–104:60–66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2016.08.009>
 9. Nikitin A.G., Laktionov S.A., Medvedeva K.S. Diagnosis of the rock crushing modes to increase the efficiency of one – roll crusher operation. *IOP Conference Series: Earth and Environment Science*. 2017;84:012033. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/84/1/012033>
 10. Nikitin A.G., Epifantsev Yu.A., Medvedeva K.S., Gerike P.B. Power analysis of the process of brittle materials destruction in universal crushing machine with roll locker. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019;62(4):303–307. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-4-303-307>; EDN: DHVFXТ.
 11. Gröndahl A., Asbjörnsson G., Hulthén E., Evertsson M. Diagnostics of cone crusher feed segregation using power draw measurements. *Minerals Engineering*. 2018;127:15–21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2018.07.008>
 12. Atta K.T., Euz'ebio T., Ibarra H., Silva Moreira V., Johansson A. Extension, Validation, and Simulation of a Cone Crusher Model. *IFAC-PapersOnLine*. 2019;52(14):1–6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.154>
 13. Sakharov D.F., Vitushkin A.V. Power analysis of the crushing process in a cone crusher. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018;61(12):980–986. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-12-980-986>; EDN: YUONPF.
 14. Maslennikov V.A. Crushers that destroy material by compression. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 1996;10–11:124–138. (In Russ.)
 15. Lagunova Yu.A. Fragility of brittle materials when they are destroyed by compression. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 1996;10–11:121–124. (In Russ.)
 16. Nikitin A.G., Sakharov D.F. Comparative analysis of energy consumption of crushers working on compression. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2011;4:56–57. (In Russ.)
 17. Klushantsev B.V., Kosarev A.I., Muizemnek Yu.A. Crushers. *Design, calculation, features of operation*. Moscow: Mashinostroenie, 1990:320.
 18. Tselikov A.I. *Machines and aggregates of metallurgical plants. Vol.1*. Moscow: Mashinostroenie. 1987:440. (In Russ.)
 19. Goulet J. *Resistance des materiaux / Bordas* Paris. 1976:192 p.
 20. Rodin R.A. About the work spent on crushing rocks. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 1987;6:84–89. (In Russ.)
- Сведения об авторах**
Александр Григорьевич Никитин, д.т.н., профессор кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0001-9198-6386
E-mail: nikitin1601@yandex.ru
SPIN-код: 9916-1572
- Юрий Андреевич Епифанцев**, к.т.н., доцент кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: epifantsev42@mail.ru
SPIN-код: 3994-4296
- Никита Максимович Курочкин**, аспирант кафедры механики и машиностроения, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: k_nikitos@mail.ru
- Information about the authors**
Aleksandr G. Nikitin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Chair Mechanics and Mechanical Engineering, Siberian State Industrial University
ORCID: 0000-0001-9198-6386
E-mail: nikitin1601@yandex.ru
SPIN-код: 9916-1572
- Yurii A. Epifuntsev**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair Mechanics and Mechanical Engineering, Siberian State Industrial University
E-mail: epifantsev42@mail.ru
SPIN-код: 3994-4296
- Nikita M. Kurochkin**, Postgraduate of the Chair of Mechanics and Machine Engineering, Siberian State Industrial University
E-mail: k_nikitos@mail.ru
- Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*
- Поступила в редакцию 10.10.2023
После доработки 24.10.2023
Принята к публикации 01.11.2023
- Received 10.10.2023
Revised 24.10.2023
Accepted 01.11.2023

Оригинальная статья

УДК 536.42:539.25:538.331

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-92-102

**ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВАЯ ОБРАБОТКА ДИФФУЗИОННЫХ
БОРОАЛИТИРОВАННЫХ СЛОЕВ НА ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ 5ХНМ**

© 2024 г. Н. С. Улаханов¹, У. Л. Мишигдоржийн¹, А. П. Семенов¹, А. С. Милонов¹,
М. С. Воробьев², П. В. Москвин^{2,1}, В. И. Шин²

¹Институт физического материаловедения Сибирского Отделения РАН (Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6)

²Институт сильноточной электроники Сибирского Отделения РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3)

Аннотация. Рассмотрено упрочнение поверхности образцов из штамповой стали 5ХНМ комбинированным методом, заключающимся в последовательном проведении химико-термической обработки с последующей модификацией полученного диффузионного слоя с помощью импульсной электронно-пучковой обработки с использованием источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления. Электронно-пучковую обработку проводили в экспериментальной установке «СОЛО», входящей в перечень уникальных электрофизических установок России. Представлены результаты локальной структурно-фазовой трансформации диффузионных бороалитированных слоев за счет скоростного нагрева электронным пучком миллисекундной длительности. Проведен сравнительный анализ строения диффузионного слоя после химико-термической обработки и последующей модификации слоя импульсным электронным пучком. Изучена микротвердость, проведена оценка фазового состояния диффузионного слоя до и после электронно-пучкового воздействия. Электронно-пучковая обработка диффузионного слоя приводит к повышению микротвердости, максимальное значений которой достигает 1400 HV, и к снижению шероховатости поверхности по параметру Ra (до семи раз). После электронно-пучковой обработки диффузионного слоя формируются фаза Fe₂B, интерметаллидные фазы FeAl, Fe₂AlCr, CrSi₂, обладающие высокой жаростойкостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, бороалитирование, импульсная электронно-пучковая обработка, сталь, микротвердость, наноструктурирование, регулировка мощности электронного пучка

Благодарности: авторы выражают признательность научному сотруднику Иркутского национального исследовательского технического университета А.Г. Тихонову за помощь в исследовании топографии поверхности

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-10163-П).

Для цитирования: Улаханов Н.С., Мишигдоржийн У.Л., Семенов А.П., Милонов А.С., Воробьев М.С., Москвин П.В., Шин В.И. Электронно-пучковая обработка диффузионных бороалитированных слоев на поверхности стали 5ХНМ. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):92–102. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-92-102](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-92-102)

Original article

ELECTRON BEAM PROCESSING OF DIFFUSION BOROALUMINIZING LAYERS ON THE SURFACE OF STEEL 5KHNM

© 2024 N. S. Ulakhanov¹, U. L. Mishigdorzhii¹, A. P. Semenov¹, A. S. Milonov¹, M. S. Vorob'ev², P. V. Moskvina^{2,1}, V. I. Shin²

¹*Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (6 Sakhyanova str., Ulan-Ude, 670047, Russian Federation)*

²*Institute of High-Current Electronics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (2/3 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)*

Abstract. The hardening of the surface of samples made of die steel 5KhNM by a combined method is considered, which consists of sequential thermal-chemical treatment (TCT) followed by modification of the resulting diffusion layer using pulsed electron beam processing using an electron source with a plasma cathode based on a low-pressure arc discharge. Electron beam processing was carried out in the SOLO experimental installation, which is included in the list of unique electrophysical installations in Russia. The results of local structural-phase transformation of diffusion boroaluminizing layers due to high-speed heating by an electron beam of millisecond duration are presented. A comparative analysis of the structure of the diffusion layer after thermal-chemical treatment and subsequent modification of the layer with a pulsed electron beam was carried out. Microhardness was studied, and the phase state of the diffusion layer was assessed before and after electron beam exposure. Electron beam treatment (EBT) of the diffusion layer leads to an increase in micro-hardness values, the maximum value of which reaches 1400 HV, and to a decrease in surface roughness values in the *Ra* parameter (up to seven times). After electron beam treatment of the diffusion layer, the Fe₂B phase and intermetallic phases FeAl, Fe₂AlCr, CrSi₂ are formed, which have high heat resistance, wear resistance and corrosion resistance.

Keywords: thermal-chemical treatment, boroaluminizing, pulsed electron beam processing, steel, microhardness, nanostructuring, regulation of electron beam power

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the research fellow of the Irkutsk National Research Technical University A.G. Tikhonov for assistance in studying surface topography.

Funding. The work was carried out with financial support from the Russian Science Foundation (project no. 19-79-10163-P).

For citation: Ulakhanov N.S., Mishigdorzhii U.L., Semenov A.P., Milonov A.S., Vorob'ev M.S., Moskvina P.V., Shin V.I. Electron beam processing of diffusion boroaluminizing layers on the surface of steel 5KHNM. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):92–102. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-92-102](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-92-102)

Введение

В машиностроении для производства формообразующих инструментов (литейных форм и штампов), работающих в условиях высоких механических и тепловых воздействий, используют специальные легированные стали [1]. Иногда рабочие поверхности формообразующих инструментов нуждаются в дополнительном упрочнении, например, при литье под давлением штампы выходят из строя из-за образования поверхностных трещин, вызванных градиентом рабочих температур [2]. Именно поэтому в машиностроении активно разрабатываются новые методы повышения эксплуатационных свойств рабочих поверхностей инструментальных сталей.

Один из классических методов повышения поверхностных свойств – химико-термическая

обработка (ХТО), которая позволяет улучшить физико-механические свойства инструментальных сталей при низкой себестоимости процесса. Боридные диффузионные покрытия повышают твердость [3, 4], увеличивают износостойкость [5], термостойкость [6] и защищают от коррозии и окисления [7]. В машиностроении также используют многокомпонентную ХТО, которая заключается в одновременном или последовательном насыщении поверхности несколькими химическими элементами [8]. Бороалитирование – один из комплексных методов ХТО, который существенно увеличивает сопротивление износу и повышает жаростойкость, коррозионную стойкость и улучшает другие свойства поверхностных слоев деталей машин [9].



Рис. 1. Схема упаковки (а) и обработки в муфельной печи (б) образцов, а также внешний вид образцов после ХТО (в)
 Fig. 1. Scheme of packing (a) and processing in a muffle furnace (б) of samples, as well as the appearance of samples after TCT (в)

Существует возможность эффективно обрабатывать поверхность металлов и сплавов с помощью концентрированных потоков энергии (КПЭ), таких как электронно-лучевое (пучковое) воздействие, отличающееся от традиционной ХТО тем, что используется кратковременное высокоэнергетическое воздействие на поверхность материала и при этом значительно повышаются функциональные свойства.

В современных исследованиях продемонстрированы результаты применения электронных пучков совместно с другими технологиями, такими как электродуговая и электроконтактная проволоочная наплавка [10], модификация поверхностных слоев аддитивно изготовленных изделий [11], поверхностное легирование [12], комбинация применения плазменных потоков с последующим низкоэнергетическим сильноточным электронным пучковым воздействием [13]. В результате обработки электронными пучками высокой плотности на поверхности обрабатываемых сталей и сплавов происходит высокоскоростная рекристаллизация, отжиг, пластическая деформация и улучшение топографии поверхности [14]. В работе [15] отмечается перспективность обработки высокоточным электронным пучком с целью удаления дефектов высокоэнтропийного сплава (ВЭС) NiCoCrAlYSi, полученного лазерной наплавкой. Установлено, что оптимальные режимы обработки электронным пучком значительно повышают износостойкость, микротвердость, модуль Юнга и снижают коэффициент трения [11]. Возможность комбинированной обработки, сочетающей традиционную ХТО и электронно-пучковую обработку (ЭПО), в литературе отражена недостаточно.

Цель настоящей работы – исследование влияния импульсного электронно-пучкового воздействия на диффузионный слой на основе бора и алюминия, сформированного химико-термической обработкой на штамповой стали марки 5ХНМ. В работе используются уникальные возможности источников электронов с

плазменным катодом, которые обеспечивают высокую плотность энергии и возможность регулировки мощности пучка в течение субмиллисекундной длительности импульса тока пучка.

Материалы и методы исследования

Химико-термическую обработку проводили в насыщающих пастах [16], содержащих в качестве активатора порошки из карбида бора, алюминия и фторида натрия: 80 % В₄С + 17 % Al + 3 % NaF (по массе). Для получения пастообразной композиции порошки были предварительно замешаны с использованием органического клея. Далее образцы из штамповой стали марки 5ХНМ помещали в прямоугольные формы вместе с пастой и утрамбовывали (рис. 1). После удаления форм полученные брикеты просушивали при температуре 50 – 100 °С в течение 2 ч. Затем брикеты загружали в нагретую до температуры обработки печь и выдерживали в течение 2 ч при температуре 950 °С. Охлаждение образцов проводили на спокойном воздухе при комнатной температуре.

Электронно-пучковую обработку диффузионного слоя проводили на установке «СОЛО» (рис. 2, а) с применением источника электронов с плазменным катодом на основе дугового разряда низкого давления [17]. Установка «СОЛО» создана в Институте сильноточной электроники СО РАН и входит в Комплекс уникальных электрофизических установок России «УНИКУУМ» [18] и дооснащена специализированным блоком питания, позволяющим изменять ток разряда плазменного катода в течение импульса субмилли- и миллисекундной длительности [19]. На рис. 2, б показана структурная схема обработки образцов в импульсной электронно-пучковой установке.

Электронно-пучковую обработку проводили в среде аргона при давлении в вакуумной камере 0,035 Па в магнитном поле величиной до 100 мТл. Энергия электронов в процессе обработки достигала 18 кэВ, диаметр пучка электронов 3 см.

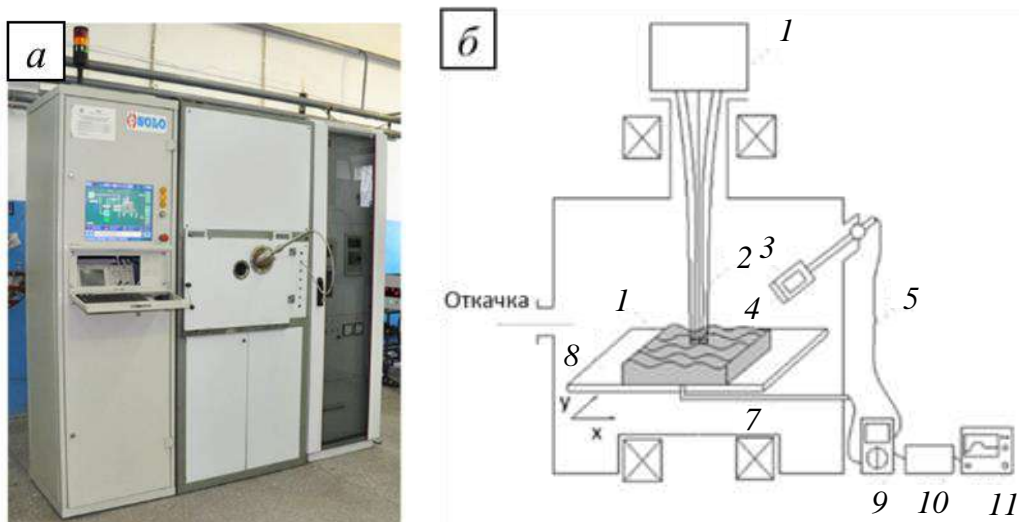


Рис. 2. Внешний вид установки «СОЛО» (а) и схема обработки образцов (б):
 1 – источник электронов; 2 – электронный пучок; 3 – объектив; 4 – кварцевое стекло; 5 – оптоволоконный кабель;
 6 – образец; 7 – термопара; 8 – стол-манипулятор; 9 – мультиметр; 10 – высокоскоростной инфракрасный
 пирометр; 11 – осциллограф

Fig. 2. External view of the «SOLO» installation (a) and sample processing scheme (b):

1 – plasma electron source; 2 – electron beam; 3 – objective; 4 – quartz glass; 5 – fiber optic cable;
 6 – sample;
 7 – thermocouple; 8 – manipulator table; 9 – multimeter; 10 – high-speed infrared pyrometer; 11 – oscilloscope

Ток пучка изменялся в течение импульса длительностью 950 мкс в пределах 20 – 120 А для обеспечения и удержания температуры 1800 – 2100 °С на поверхности образца через 150 мкс. Поверхность образцов подвергали трем импульсам воздействия, интервал времени между которыми составлял 3 с. Характерные осциллограммы представлены на рис. 3.

Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе «МЕТАМ РВ-34» с цифровой камерой «Altami Studio». Элементный состав исследовали на растровом электронном микроскопе JSM-6510LV JEOL с системой микроанализа INCA Energy 350, Oxford Instruments в

Центре коллективного пользования «Прогресс» ФГБОУ ВО «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления». Определение микротвердости полученных слоев осуществлялось на микротвердомере ПМТ-3М. Нагрузка составляла 0,49 Н.

Топография поверхности опытных образцов была исследована на оптическом профилометре Bruker Contour GT-K1 в «Иркутском национальном исследовательском техническом университете». Метод измерения – вертикальная сканирующая интерферометрия (в белом свете) и фазовая интерферометрия.



Рис. 3. Характерные осциллограммы тока разряда плазменного катода (I_d , 40 А/клетка), тока в ускоряющем промежутке (I_g , 40 А/клетка), ускоряющего напряжения (U_g , 5 кВ/клетка) и температуры (T , 400 °С/клетка+ 300 °С)

Fig. 3. Typical oscillograms of the plasma cathode discharge current (I_d , 40 A/cell), current in the accelerating gap (I_g , 40 A/cell), accelerating voltage (U_g , 5 kV/cell) and temperature (T , 400 °C/cell + 300 °C)

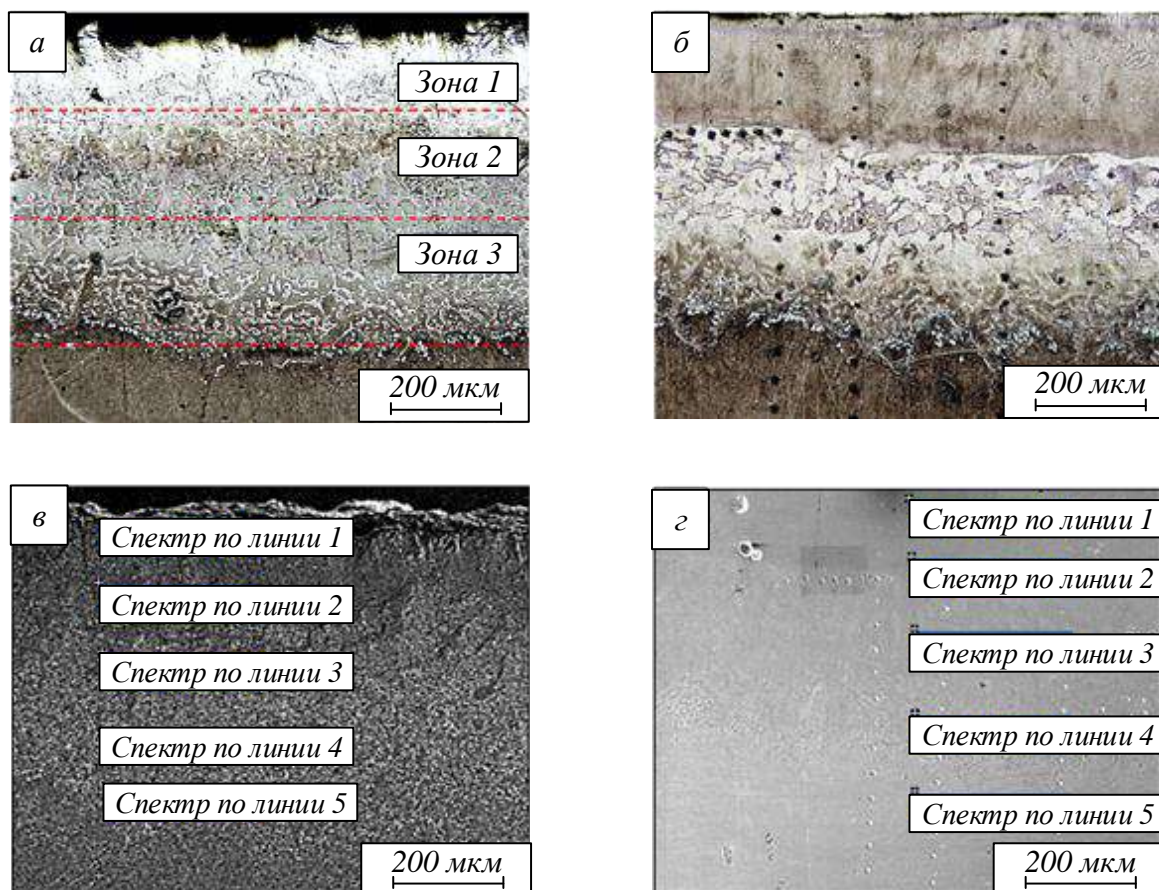


Рис. 4. Структура диффузионного слоя:

a – оптическое изображение ДС после ХТО; *б* – оптическое изображение ДС после ЭПО; *в* – изображение участков анализа ДС во вторичных электронах после ХТО; *г* – изображение участков анализа ДС во вторичных электронах после ЭПО

Fig. 4. Structure of the diffusion layer:

a – optical image after TCT; *б* – optical image after EBT; *в* – image of areas of diffusion layer analysis in secondary electrons after TCT; *г* – image of areas of diffusion layer analysis in secondary electrons after EBT

Результаты эксперимента и их обсуждение

В результате ХТО на поверхности стали марки 5ХНМ образовался диффузионный слой (ДС) толщиной до 650 мкм (рис. 4, *a*, *в*), где твердые структурные составляющие (бориды и карбиды)

располагаются в матрице из более пластичных фаз (алюминиды, твердые растворы алюминия и углерода в α -железе). В зависимости от расстояния от поверхности в диффузионном слое можно выделить несколько структурных зон:

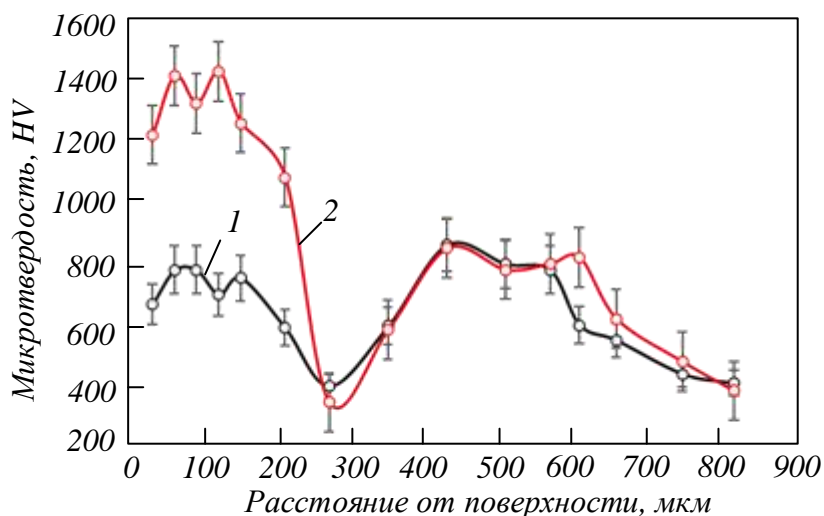


Рис. 5. Распределение микротвердости по глубине слоя после ХТО (1) и после ХТО + ЭПО (2)

Fig. 5. Microhardness distribution by layer depth after CTO (1) and after CTO + EPO (2)

Т а б л и ц а 1

Элементный состав по глубине диффузионного слоя на стали 5ХНМ после ХТО
 Table 1. Elemental composition according to the depth of the diffusion layer on
 5KhNM steel after TCT

Спектр по линии	Содержание элемента, %						
	C	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
1	5,48	8,54	0,35	0,46	0,51	82,78	1,88
2	20,16	7,27	0,27	0,43	0,49	70,06	1,32
3	6,59	7,80	0,35	0,69	0,59	82,83	1,14
4	5,99	5,54	0,57	0,54	0,70	85,68	0,98
5	7,93	0,14	0,12	1,56	0,67	88,81	0,76

верхняя зона 1 состоит из крупных светлых кристаллов; зоны 2 и 3 имеют ячеистую структуру (вторая и третья зоны с преобладанием темных фаз, возможно, ферритными кристаллами, первая зона – с преобладанием светлых фаз) [16].

Обработка диффузионного слоя методом ЭПО приводит к структурной трансформации всего слоя и формированию на глубине до 220 мкм зоны переплава (рис. 4, б, в), характеризующейся ячеистой структурой кристаллизации.

Микротвердость после ХТО составляет примерно 670 HV на поверхности образца, затем наблюдается периодичность изменения значений, которые варьируются в интервале 400 – 860 HV при микротвердости основного металла 350 – 400 HV (рис. 5). Максимальная микротвердость составляет примерно 850 HV на глубине 430 мкм. Такой характер распределения микротвердости по глубине может быть объяснен градиентным распределением бора, алюминия и легирующих элементов из стали-основы [16]. Электронно-пучковая обработка приводит к увеличению микротвердости на поверхности до 1200 HV, максимальное значение 1400 HV достигается на глубине 150 мкм. На глубине более 220 мкм характер распределения микротвердости соответствует диффузионному слою после ХТО.

Концентрация алюминия после ХТО плавно снижается по направлению к основному металлу с 8,54 до 0,14 % (табл. 1). Электронно-пучковая обработка приводит к снижению максимальной концентрации алюминия до 5,81 % (табл. 2). По-

сле ЭПО наблюдается повышение концентрации кремния и хрома, которые коррелируют с результатами рентгенофазового анализа. Так, на поверхности после ХТО формируются следующие фазы: FeB, Fe₂B, FeAl (рис. 6). Электронно-пучковая обработка диффузионного слоя приводит к формированию на поверхности диборида железа Fe₂B, интерметаллидных фаз FeAl, Fe₂AlCr, CrSi₂, которые обладают высокой жаростойкостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью (рис. 6).

Атомно-силовая микроскопия выявила ячеистую структуру кристаллизации диффузионного слоя после электронно-пучковой обработки (рис. 7, а). Топографическое изображение поверхности характеризуется наличием отдельных крупных частиц округлой формы размером до 2 мкм, выступающих над поверхностью шлифа на высоту (h) более 150 нм, а также множественными включениями, выступающими над поверхностью на высоту 10 – 50 нм (рис. 7, б). Известно, что формирование субмикро- и нанокристаллических структур в модифицированном слое обуславливает высокие механические свойства защитных покрытий [20]. Наличие такой структуры обеспечивает повышенную микротвердость после ЭПО в бороалитированном слое.

Электронно-пучковая обработка по описанным выше режимам приводит к скоростному воздействию на поверхность энергии высокой плотности (до 0,5 МВт/см²), вызывая высокоскоростное плавление и рекристаллизацию диффузи-

Т а б л и ц а 2

Элементный состав по глубине диффузионного слоя на стали 5ХНМ после ЭПО
 Table 2. Elemental composition according to the depth of the diffusion layer on 5KhNM steel after EBT

Спектр по линии	Содержание элемента, %						
	C	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
1	4,37	5,81	0,42	0,65	0,07	87,16	1,35
2	3,98	4,76	0,48	0,65	0,02	88,86	1,15
3	4,12	2,31	0,27	1,19	0,69	90,40	0,93
4	6,14	2,89	0,31	1,13	1,72	86,21	0,78
5	5,84	0,89	0,33	0,55	0,54	90,59	1,25

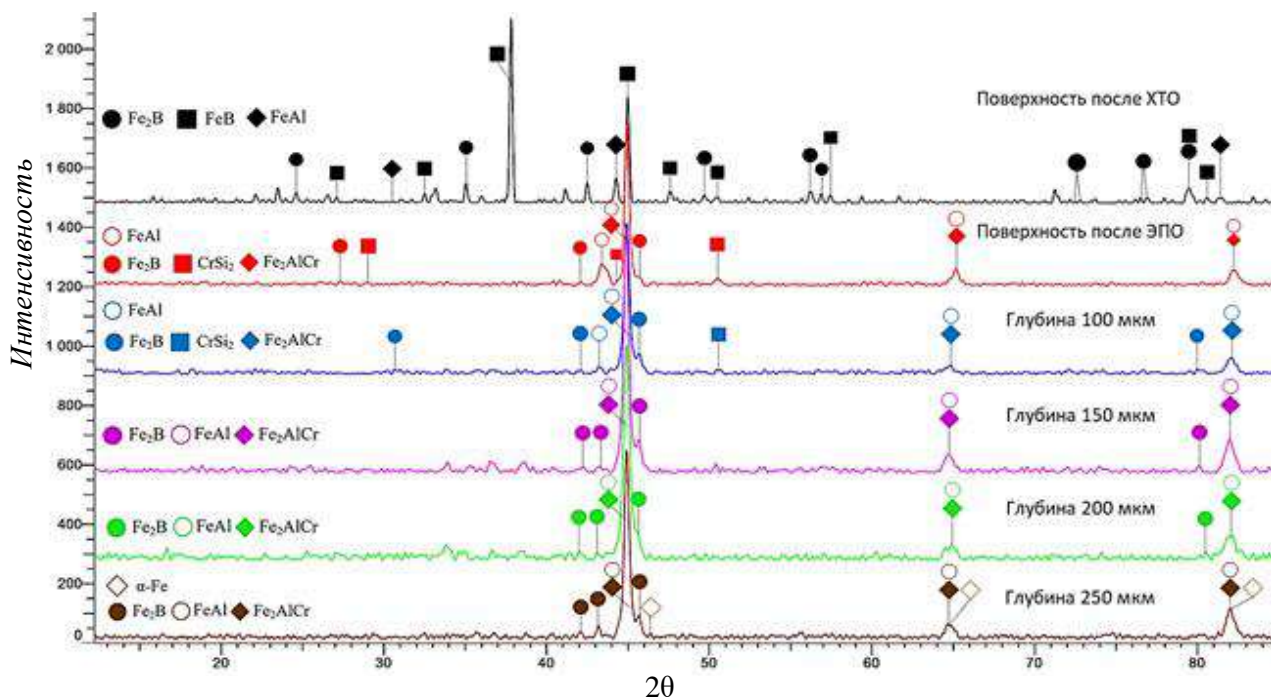


Рис. 6. Рентгенограмма модифицированного слоя
Fig. 6. X-ray diffraction pattern of the modified layer

онного слоя на стали марки 5ХНМ глубиной до 220 мкм с изменением топографии поверхности. В результате ХТО происходит изменение микро-рельефа по сравнению с исходным образцом, появлению выступов и других микронеровностей (рис. 8, а.) Так, после ХТО значение R_a составляет 4,792 мкм, максимальное значение выступов R_{max} составляет примерно 42 мкм [16]. Электронно-пучковая обработка диффузионного слоя сопровождается плавлением и движением расплава под действием сил поверхностного натяжения и заполнением пор. Шероховатость снизится до $R_a = 0,157$ мкм, максимальное значение R_{max} не превышает 0,7 мкм (рис. 8, б).

Выводы

Электронно-пучковая обработка диффузионного боролитированного слоя на стали марки 5ХНМ приводит к изменению структуры слоя в верхней части на глубинт до 220 мкм. Шероховатость значительно снижается по сравнению с ХТО (до семи раз). Такой подход реализует тепловое воздействие на поверхность с высокой плотностью энергии (до 0,5 МВт/см²), вызывает быстрое плавление и рекристаллизацию. Длительность импульса электронного пучка составляет несколько сотен микросекунд, что позволяет распространить термический эффект на указанную глубину, не затрагивая основной объем диффузионного слоя, сформированного на этапе ХТО.

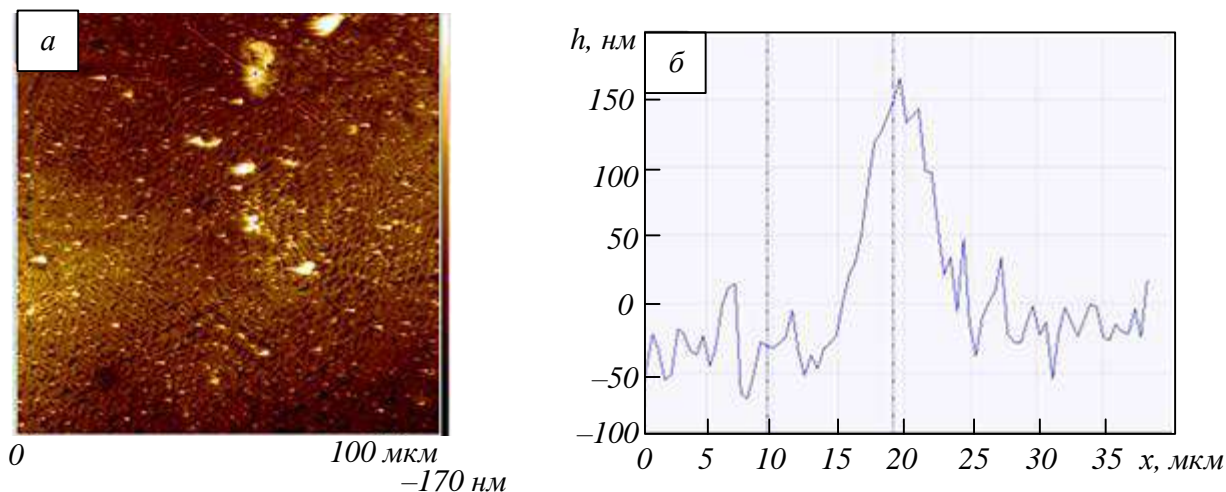


Рис. 7. АСМ-изображение (а) и профиль поверхности (б)
Fig. 7. AFM images (a) and surface profile (b)

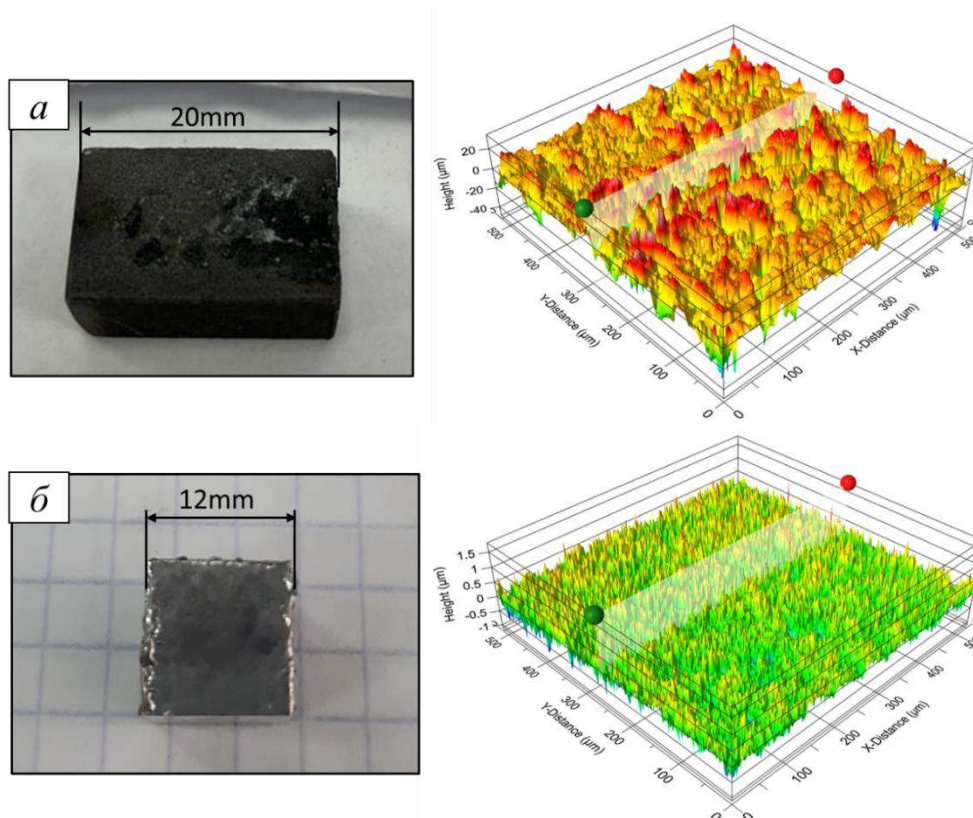


Рис. 8. Топография поверхности после ХТО (а) и после ЭПО (б)
 Fig. 8. Surface topography after TCT (a) and after EBТ (b)

Электронно-пучковая обработка приводит к формированию заданного фазового состава на поверхности, повышает твердость слоя, что позволяет применять способ комбинированной обработки для стали марки 5ХНМ, используемой для изготовления штамповой оснастки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bao Z.-J., Yang H.-Y., Dong B.-X., Chang F., Li C.-D., Jiang Y., Chen L.-Y., Shu S.-L., Jiang Q.-C., Qiu F. Development trend in composition optimization, microstructure manipulation, and strengthening methods of die steels under lightweight and integrated die casting. *Materials*. 2023;16(18):6235. <https://doi.org/10.3390/ma16186235>
2. Weinert A., Tormey D., O'Hara C., McAfee M. Condition monitoring of additively manufactured injection mould tooling: A review of demands, opportunities and potential strategies. *Sensors*. 2023;23(4):2313. <https://doi.org/10.3390/s23042313>
3. Milinović A., Stojšić J., Kladarić I., Matijević B. Evaluation of boride layers on C70W2 steel using a new approach to characterization of boride layers. *Materials*. 2022;15(11):3891. <https://doi.org/10.3390/ma15113891>
4. Полянский И.П., Вихрев Р.О., Сизов И.Г. Структура и свойства боридных покрытий на инструментальных сталях. *Ползуновский вестник*. 2023;1:171–177. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.021>
5. Pashechko M., Dziejczak K., Jozwik J. Analysis of wear resistance of borided steel C45. *Materials*. 2020;13(23):5529. <https://doi.org/10.3390/ma13235529>
6. Пугачева Н.Б., Быкова Т.М. Исследование методов борирования, анализ структуры и свойств получаемых покрытий. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2020;2:38–60. <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2020.2.038-060>
7. Mednikov A., Tkhabisimov A., Kalakuckaya O., Zilova O., Kachalin G. Studies of boriding using possibility to increase the corrosion resistance of cast steel 20GL. *Coatings*. 2022;12(11):1789. <https://doi.org/10.3390/coatings12111789>
8. Bartkowska A., Bartkowski D., Przystacki D., Hajkowski J., Miklaszewski A. Microstructural and mechanical properties of B-Cr coatings formed on 145Cr6 tool steel by laser remelting of diffusion borochromized layer using diode laser. *Coatings*. 2021;11(5):608. <https://doi.org/10.3390/coatings11050608>

9. Günen A., Ergin Ö. A comparative study on characterization and high-temperature wear behaviors of thermochemical coatings applied to cobalt-based haynes 25 superalloys. *Coatings*. 2023; 13(7):1272. <https://doi.org/10.3390/coatings13071272>
10. Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Громов В.Е., Шлярова Ю.А., Кондратова О.А., Кириллова А.В. Структурно-фазовые состояния и свойства высокотемпературного сплава CrMnFeCoNi после электронно-пучковой обработки. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2022;2 (40):47–56.
11. Тересов А.Д., Петрикова Е.А., Иванов Ю.Ф., Крысина О.В., Прокопенко Н.А. Электронно-пучковая обработка поверхности металлических материалов, изготовленных аддитивным способом. *Известия вузов. Физика*. 2022;65(11(780)):168–175. <https://doi.org/10.17223/00213411/65/11/168>
12. Valkov S., Dechev D., Ivanov N., Bezdushnyi R., Ormanova M., Petrov P. Influence of beam power on young's modulus and friction coefficient of Ti-Ta alloys formed by electron-beam surface alloying. *Metals*. 2021;11(8):1246. <https://doi.org/10.3390/met11081246>
13. Невский С.А., Сарычев В.Д., Громов В.Е. Комбинированные гидродинамические неустойчивости и их роль в образовании микро- и наноструктур материалов при плазменных воздействиях. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;1(43):10–16. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-10-16](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-10-16)
14. Konovalov S., Ivanov Y., Gromov V., Panchenko I. Fatigue-induced evolution of ALSi 310S steel microstructure after electron beam treatment. *Materials*. 2020;13(20):4567. <https://doi.org/10.3390/ma13204567>
15. Cai J., Yao Y., Gao C., Lyu P., Meng X., Guan Q., Li Y., Han Z. Comparison of microstructure and oxidation behavior of NiCoCrAlYSi laser cladding coating before and after high-current pulsed electron beam modification. *Journal of alloys and Compounds*. 2021;881:160651. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2021.160651>
16. Улаханов Н., Мишигдоржийн У., Тихонов А., Шустов А., Пятых А. Модификация поверхностного слоя штамповых сталей созданием В-АI-слоев химико-термической обработкой. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2021;17(12(204)):557–564. <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2021-17-12-557-564>
17. Koval N.N., Devyatkov V.N., Vorobyev M.S. Electron sources with plasma grid emitters: progress and prospects. *Russ Phys J*. 2021;63:1651–1660. <https://doi.org/10.1007/s11182-021-02219-3>
18. Vorobyov M., Koval T., Shin V., Moskvina P., Tran M.K.A., Koval N., Ashurova K., Doroshkevich S., Torba M. Controlling the Specimen surface temperature during irradiation with a submillisecond electron beam produced by a plasma-cathode electron source. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2021;49(9):2550–2553. <https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3089001>
19. Vorobyov M.S., Moskvina P.V., Shin V.I., Koval T.V., Devyatkov V.N., Doroshkevich S.Y., Koval N.N., Torba M.S., Ashurova K.T. Negative current feedback in the accelerating gap in electron sources with a plasma cathode. *Technical Physics*. 2022;67(6):747–752. <http://dx.doi.org/10.21883/TP.2022.06.54422.14-22>
20. Рубанникова Ю.А., Иванов Ю.Ф., Романов Д.А., Кормышев В.Е. Механические и трибологические свойства борированного слоя, наплавленного на низкоуглеродистую сталь. *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2019;16(3):387–393.

REFERENCES

1. Bao Z.-J., Yang H.-Y., Dong B.-X., Chang F., Li C.-D., Jiang Y., Chen L.-Y., Shu S.-L., Jiang Q.-C., Qiu F. Development trend in composition optimization, microstructure manipulation, and strengthening methods of die steels under light-weight and integrated die casting. *Materials*. 2023;16(18):6235. <https://doi.org/10.3390/ma16186235>
2. Weinert A., Tormey D., O'Hara C., McAfee M. Condition monitoring of additively manufactured injection mould tooling: A review of demands, opportunities and potential strategies. *Sensors*. 2023;23(4):2313. <https://doi.org/10.3390/s23042313>
3. Milinović A., Stojšić J., Kladarić I., Matijević B. Evaluation of boride layers on C70W2 steel using a new approach to characterization of boride layers. *Materials*. 2022;15(11):3891. <https://doi.org/10.3390/ma15113891>
4. Polyansky I.P., Vikhrev R.O., Sizov I.G. Structure and properties of boride coatings on tool steels. *Polzunovsky bulletin*. 2023;1:171–177. (In Russ.). <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.01.021>
5. Pashechko M., Dziedzic K., Jozwik J. Analysis of wear resistance of borided steel C45. *Materials*. 2020;13(23):5529. <https://doi.org/10.3390/ma13235529>
6. Pugacheva N.B., Bykova T.M. Investigation of boration methods, analysis of the structure and properties of the coatings obtained. *Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures*. 2020,2:38–60. (In Russ.). <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2020.2.038-060>
7. Mednikov A., Tkhabisimov A., Kalakuckaya O., Zilova O., Kachalin G. Studies of boriding using

- possibility to increase the corrosion resistance of cast steel 20GL. *Coatings*. 2022;12(11):1789. <https://doi.org/10.3390/coatings12111789>
8. Bartkowska A., Bartkowski D., Przystacki D., Hajkowski J., Miklaszewski A. Microstructural and mechanical properties of B-Cr coatings formed on 145Cr6 tool steel by laser remelting of diffusion borochromized layer using diode laser. *Coatings*. 2021;11(5):608. <https://doi.org/10.3390/coatings11050608>
 9. Günen A., Ergin Ö. A comparative study on characterization and high-temperature wear behaviors of thermochemical coatings applied to cobalt-based haynes 25 superalloys. *Coatings*. 2023; 13(7):1272. <https://doi.org/10.3390/coatings13071272>
 10. Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Grmov V.E., Shlyarova Yu.A., Kondratova O.A., Kirillova A.V. Structural-phase states and properties of high-entropy CrMnFeCoNi alloy after electron-beam processing. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022;2(40):47–56. (In Russ.).
 11. Tarasov A.D., Petryakova E.A., Ivanov Yu.F., Krysinina O.V., Prokopenko N.A. Electron beam surface treatment of metal materials manufactured by additive method. *News of universities. Physics*. 2022;65(11(780)):168–175. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/00213411/65/11/168>
 12. Valkov S., Dechev D., Ivanov N., Bezdushnyi R., Ormanova M., Petrov P. Influence of beam power on young's modulus and friction coefficient of Ti-Ta alloys formed by electron-beam surface alloying. *Metals*. 2021;11(8):1246. <https://doi.org/10.3390/met11081246>
 13. Nevsky S.A., Sarychev V.D., Gromov V.E. Combined hydrodynamic instabilities and their role in the formation of micro- and nanostructures of materials under plasma influences. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;1(43):10–16. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1\(43\)-10-16](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-1(43)-10-16)
 14. Konovalov S., Ivanov Y., Gromov V., Panchenko I. Fatigue-induced evolution of ALSI 310S steel microstructure after electron beam treatment. *Materials*. 2020;13(20):4567. <https://doi.org/10.3390/ma13204567>
 15. Cai J., Yao Y., Gao C., Lyu P., Meng X., Guan Q., Li Y., Han Z. Comparison of microstructure and oxidation behavior of NiCoCrAlYSi laser cladding coating before and after high-current pulsed electron beam modification. *Journal of alloys and Compounds*. 2021;881:160651. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2021.160651>
 16. Ulukhanov N., Mishigdorjiin U., Tikhonov A., Shustov A., Pyatykh A. Modification of the surface layer of stamped steels by creating B-Al layers by chemical and thermal treatment. *Reinforcing technologies and coatings*. 2021;17(12(204)):557–564. (In Russ.). <https://doi.org/10.36652/1813-1336-2021-17-12-557-564>
 17. Koval N.N., Devyatkov V.N., Vorobyev M.S. Electron sources with plasma grid emitters: progress and prospects. *Russ Phys J*. 2021;63:1651–1660. <https://doi.org/10.1007/s11182-021-02219-3>
 18. Vorobyov M., Koval T., Shin V., Moskvina P., Tran M.K.A., Koval N., Ashurova K., Doroshkevich S., Torba M. Controlling the Specimen surface temperature during irradiation with a submillisecond electron beam produced by a plasma-cathode electron source. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2021;49(9):2550–2553. <https://doi.org/10.1109/TPS.2021.3089001>
 19. Vorobyov M.S., Moskvina P.V., Shin V.I., Koval T.V., Devyatkov V.N., Doroshkevich S.Y., Koval N.N., Torba M.S., Ashurova K.T. Negative current feedback in the accelerating gap in electron sources with a plasma cathode. *Technical Physics*. 2022;67(6):747–752. <http://dx.doi.org/10.21883/TP.2022.06.54422.14-22>
 20. Bannikova Yu.A., Ivanov Yu.F., Romanov D.A., Kormyshev V.E. Mechanical and tribological properties of the boron layer deposited on low-carbon steel. *Fundamental problems of modern materials science*. 2019;16(3):387–393. (In Russ.).

Сведения об авторах

Николай Сергеевич Улаханов, научный сотрудник лаборатории физического материаловедения, Институт физического материаловедения Сибирского отделения РАН

E-mail: nulahanov@mail.ru

ORCID 0000-0002-0635-4577

SPIN-код: 8147-1096

Ундрах Лхагвасуренович Мишигдоржийн, к.т.н., заведующий лабораторией физического материаловедения, Институт физического материаловедения Сибирского отделения РАН

E-mail: undrakh@ipms.bscnet.ru

ORCID 0000-0002-7863-9045

SPIN-код: 2781-4995

Александр Петрович Семенов, д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории физического материаловедения, Институт физического материаловедения Сибирского отделения РАН

E-mail: alexandersemenov2018@mail.ru

ORCID 0000-0002-1817-3044

SPIN-код: 8786-3514

Александр Станиславович Милонов, к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории физического материаловедения, Институт физического материаловедения Сибирского отделения РАН
E-mail: terwer81@mail.ru
ORCID 0000-0001-7397-3581
SPIN-код: 6757-0787

Максим Сергеевич Воробьев, д.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН
E-mail: vorobyovms@yandex.ru
ORCID 0000-0001-5136-5905
SPIN-код: 9881-0267

Павел Владимирович Москвин, научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН
E-mail: pavelmoskvin@mail.ru
ORCID 0000-0002-5240-9970
SPIN-код: 3572-1028

Владислав Игоревич Шин, научный сотрудник лаборатории плазменной эмиссионной электроники, Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН
E-mail: shin.vi@yandex.ru
ORCID 0000-0003-4888-4338
SPIN-код: 3913-6074

Information about the authors:

Nikolai S. Ulakhanov, Researcher, Laboratory of Physical Materials Science, Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
Email: nulahanov@mail.ru
ORCID: 0000-0002-0635-4577
SPIN-код: 8147-1096

Undrakh L. Mishigdorzhiiin, Cand. Sci. (Eng.), Head of the Laboratory of Physical Materials Science, Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
E-mail: undrakh@ipms.bscnet.ru
ORCID: 0000-0002-7863-9045
SPIN-код: 2781-4995

Alexander P. Semenov, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory of Physical Materials Science, Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
E-mail: alexandersemenov2018@mail.ru
ORCID: 0000-0002-1817-3044
SPIN-код: 8786-3514

Aleksandr S. Milonov, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher at the Laboratory of Physical Materials Science, Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
E-mail: terwer81@mail.ru
ORCID 0000-0001-7397-3581
SPIN-код: 6757-0787

Maksim S. Vorob'ev, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher at the laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High-Current, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
E-mail: vorobyovms@yandex.ru
ORCID 0000-0001-5136-5905
SPIN-код: 9881-0267

Pavel V. Moskvin, Researcher at the Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
E-mail: pavelmoskvin@mail.ru
ORCID 0000-0002-5240-9970
SPIN-код: 3572-1028

Vladislav I. Shin, Researcher of Laboratory of Plasma Emission Electronics, Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
E-mail: shin.vi@yandex.ru
ORCID 0000-0003-4888-4338
SPIN-код: 3913-6074

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 17.11.2023

После доработки 13.02.2024

Принята к публикации 19.02.2024

Received 17.11.2023

Revised 13.02.2024

Accepted 19.02.2024

Оригинальная статья

УДК 622.273.217.4: [658.567.1:669.1]

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-103-110

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАКЛАДОЧНОЙ СМЕСИ ДЛЯ ТАШТАГОЛЬСКОГО РУДНИКА

© 2024 г. В. И. Мурко, И. В. Спиридонова, И. Д. Селиванов

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

Аннотация. Актуальность работы обусловлена, с одной стороны, необходимостью решения проблемы проседания земной поверхности в районах подземных горных работ, а с другой – размещением значительного количества золошлаковых отходов угольных ТЭЦ и котельных, отходов горнодобывающей и металлургической промышленности. В настоящей работе приведено описание работы закладочного комплекса на Таштагольском руднике АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Представлен типовой состав закладочной смеси, наиболее дорогостоящими компонентами которой являются цемент Топкинского цементного завода и доменный гранулированный шлак, доставляемый с металлургического комбината в г. Новокузнецк. Проведенными исследованиями установлена возможность оптимизации состава закладочной смеси путем замены цемента и гранулированного шлака на золу уноса «Западно-Сибирской ТЭЦ». Подготовку смеси проводили в лабораторной стержневой мельнице с подбором режима измельчения исходных материалов. В экспериментах добивались необходимых значений крупности (не более 5 % остатка на сите № 0,14) и подвижности закладочной смеси путем добавления воды. Подвижность смеси определяли на приборе Суттарда, встряхивающем столике и стандартном конусе. Представлена методика расчета промышленной стержневой мельницы для замены шаровых мельниц, установленных на руднике. Из подготовленной в лабораторных условиях закладочной смеси готовили образцы твердеющей закладки. Результаты исследований образцов твердеющей закладки показали необходимую прочность при времени выдержки в условиях, моделирующих горную выработку, более 90 суток (более 4 МПа), при этом плотность закладочной смеси составила более 2 г/см³ при замене 50 % на золу уноса.

Ключевые слова: закладочная смесь, Таштагольский рудник, золошлаковые отходы, цемент, доменный гранулированный шлак, стержневая мельница

Для цитирования: Мурко В.И., Спиридонова И.В., Селиванов И.Д. Оптимизация закладочной смеси для Таштагольского рудника. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):103–110. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-103-110](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-103-110)

Original article

OPTIMIZATION OF THE FILLING MIXTURE FOR THE TASHTAGOL MINE

© 2024 V. I. Murko, I. V. Spiridonova, I. D. Selivanov

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

Abstract. The relevance of the work is due, on the one hand, to the need to solve the problem of subsidence of the earth's surface in areas of underground mining, and, on the other, to the placement of a significant amount of ash and slag waste from coal-fired thermal power plants and boiler houses, waste from the mining and metallurgical industries. This paper describes the operation of the laying complex at the Tashtagolsky mine of JSC EVRAZ ZSMK JSC. The typical composition of the filling mixture is presented, the most expensive components of which are cement from the Topkinsky cement plant and blast furnace granulated slag delivered from the metallurgical plant in Novokuznetsk. The conducted research has established the possibility of optimizing the composition of the filling mixture by replacing cement and granular slag with fly ash from the West Siberian thermal power plant. The preparation of the mixture was carried out in a laboratory rod mill with the selection of

the grinding mode of the starting materials. In experiments, the required values of fineness (no more than 5 % of the residue on the sieve No. 0.14) and mobility of the filling mixture were achieved by adding water. The mobility of the mixture was determined on a Souttard device, a shaking table and a standard cone. A method for calculating an industrial rod mill to replace ball mills installed at the mine is presented. Samples of the hardening bookmark were prepared from the prepared in laboratory conditions. The results of studies of the hardening bookmark samples showed the necessary strength at a holding time in conditions simulating mining for more than 90 days (more than 4 MPa), while the density of the laying mixture was more than 2 g/cm³ when replacing 50 % with fly ash.

Keywords: filling mixture, Tashtagol mine, ash and slag waste, cement, blast furnace granulated slag, rod mill

For citation: Murko V.I., Spiridonova I.V., Selivanov I.D. Optimization of the filling mixture for the Tashtagol mine. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47): 103–110. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-103-110](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-103-110)

Введение

При разработке месторождений твердых полезных ископаемых, в том числе угольных и рудных, во многих регионах России возникают проблемы экологического характера, связанные с проседанием земной поверхности в районах подземных работ [1], а также со складированием и хранением значительного объема золошлаковых отходов (ЗШО) угольных ТЭЦ и отходов горнодобывающей и металлургической промышленности [2]. Особую остроту данная проблема приобретает в Кемеровской области – Кузбассе, Хакасии и в других регионах с горнодобывающей промышленностью, а также в некоторых странах ближнего [3] и дальнего зарубежья [4].

Закладка заключается в заполнении выработок отходами производства: пустыми породами [5], хвостами обогатительных фабрик [6], металлургическими шлаками [7] или другими материалами [8]. Это требует затрат, но дает возможность более полной выемки полезного ископаемого (без оставления целиков и обрушения вмещающих пород). Таким образом, обеспечиваются: минимальные потери и разубоживание руды, сохранение ненарушенными налегающих массивов и земной поверхности (при полной и плотной закладке), возможность отработки возгорающихся руд, размещение под землей части отходов производства [10].

Твердеющая литая закладка – наиболее распространенный вид закладки, обеспечивающий высокое ее качество [11]. На поверхностном комплексе приготавливают закладочную смесь, близкую по своим свойствам к литому песчаному или обычному (с крупным заполнителем) бетону [12]. Подготовленная смесь характеризуется повышенным расходом вяжущих веществ и воды с целью обеспечения высокой ее пластичности и подвижности [13]. Подвижность смеси должна обеспечивать ее транспортабельность и

размещение в выработанном пространстве под небольшим углом (1 – 5 и до 10°) [14].

Одной из проблем по оптимизации составов закладочной смеси является замена цемента на техногенные отходы, например на золу уноса и тонкомолотый стеклобой [15], наполнитель для удешевления цемента [16]. Процессы гидратации золы в пуццолановых цементах изучали и зарубежные ученые [17], в качестве заполнителей предлагают применять золошлаковые смеси после отходов обогащения угля [18], смесь золы уноса и шлака [19]. Авторами работы [20] рассмотрен механизм гидратации цемента на основе шлаков в составе закладки.

На Таштагольском руднике работает закладочный комплекс, состоящий из склада исходных материалов (хвосты дробильно-обогатительной фабрики (ДОФ), доменный гранулированный шлак, цемент) и измельчительно-отделения с бункерным хозяйством. Со склада хвосты ДОФ и доменный гранулированный шлак автотранспортом доставляются до бункерного хозяйства и загружаются в соответствующие аккумулирующие бункера, из которых ленточными конвейерами подаются в расходные бункера. Из расходных бункеров данные материалы дозированно поступают на сборный ленточный конвейер. На данный конвейер также дозируется цемент из отдельного расходного бункера, куда он поступает с помощью винтового конвейера со склада. Смесь исходных материалов со сборного ленточного конвейера загружается в течку шаровой мельницы, куда также дозированно подается вода. После мокрого измельчения полученная закладочная смесь выгружается в зумпф, из которого самотеком направляется в специальный желоб, по которому доставляется до предварительно подготовленной заполняемой выработки. На руднике работают две технологические линии мокрого измельчения.

Химический состав золы уноса
Table 1. Chemical composition of fly ash

Элемент	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	C	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	S	P	K ₂ O
Содержание, %	56,29	8,93	5,38	8,50	14,71	1,50	0,15	0,15	0,11	0,97
Элемент	K ₂ O	Na ₂ O	BaO	SrO	ZnO	TiO ₂	ZrO ₂	Cr ₂ O ₃	NiO	–
Содержание, %	0,97	1,16	0,19	0,10	0,014	0,91	0,051	0,15	0,016	–

Типовой состав применяемой на Таштагольском руднике закладочной смеси: ПЦ М400 (г. Топки) 40 кг, доменный гранулированный шлак 400 кг, хвосты дробильно-обогащительной фабрики (ДОФ) – заполнитель (г. Таштагол) 1200 кг, вода 500 л (на 1 м³). Наиболее дорогостоящими компонентами закладки являются цемент и доменный гранулированный шлак.

Цель настоящей работы состояла в определении оптимального состава закладочной смеси для применения на Таштагольском руднике за счет снижения количества цемента и доменного гранулированного шлака с сохранением требуемых характеристик.

В процессе исследований решались следующие задачи:

- определение необходимого времени помола материалов в стержневой мельнице при типовом составе закладочной смеси для достижения требуемой крупности твердых частиц в готовой смеси;
- определение оптимального состава закладочной смеси с уменьшением количества цемента и гранулированного шлака;
- определение подвижности полученных проб закладочной смеси;
- оформление методики расчета производительности промышленной стержневой мельницы;
- изготовление образцов твердеющего закладочного материала;
- исследование полученных образцов закладочного материала на прочность.

Методы и принципы исследования

Для оптимизации состава закладочной смеси путем замещения части цемента и доменного гранулированного шлака была использована зола уноса «Западно-Сибирской ТЭЦ» АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-сибирский металлургический комбинат» (ЕВРАЗ ЗСМК). В табл. 1 (здесь и далее % (по массе)) представлен химический состав (рентгеноспектральный анализ) золы уноса. Преобладание кремнезема и глинозема свидетельствует о том, что зола является кислой, так как модуль основности (Мо), определяемый как $(CaO + MgO) / (Al_2O_3 + SiO_2)$, равен 0,1.

Анализ химического состава золы уноса «Западно-Сибирской ТЭЦ» показывает, что данный продукт соответствует требованиям ГОСТ 25818 – 2017 (табл. 2) и может быть использован для приготовления бетонных смесей.

Минералогический состав золы уноса определялся рентгеноструктурным способом, который показал, что в золе преобладает рентгеноаморфное вещество. Также присутствуют в небольшом количестве: α-SiO₂ – α-кварц, 3Al₂O₃·2SiO₂ – муллит, Fe₃O₄ – магнетит, вероятно С – графит (следы механического недожога), примеси.

Все компоненты закладочной смеси являются сыпучими материалами, насыпные плотности золы уноса, доменного граншлака и хвостов ДОФ составляют 900 – 950, 1200 – 1240 и 1700 – 1750 кг/м³ соответственно. Зола уноса является тонкодисперсным материалом и характеризуется

Результаты сравнения показателей качества летучей золы уноса «Западно-Сибирская ТЭЦ»
Table 2. The results of comparing the quality indicators of fly ash entrainment “West Siberian thermal power plant”

Содержание	Ед. измерения	Значения по ГОСТ	Результаты по протоколу	Результат сравнения
CaO	%, не более	10	5,38	Соответствует
MgO	%, не более	5	1,50	Соответствует
SO ₃	%, не более	3	0,15	Соответствует
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (56,29 + 14,71 + 8,9)	%, не менее	70	79,90	Соответствует

Техническая характеристика лабораторной стержневой мельницы
Table 3. Technical characteristics of the laboratory rod mill

Показатель	Единица измерения	Значение
Диаметр барабана	мм	300
Длина барабана	мм	450
Частота вращения барабана	об./мин	47
Мощность двигателя	кВт	1
Масса стержневой загрузки	кг	55
Коэффициент относительной скорости вращения	%	61



Рис. 1. Отбор пробы закладочной смеси из стержневой мельницы

Fig. 1. Sampling of the filling mixture from the core mill

остатком на сите № 02 – $10 \div 15$ %. Доменный граншлак в виде песка с крупностью до 3,0 (3,2) мм. Хвосты ДОФ представлены классами крупности 5 – 10 и 10 – 20 мм.

Для расчета производительности промышленной стержневой мельницы по данным лабораторных испытаний использована известная методика В.А. Олевского [10]. Для указанного расчета необходимо определить удельную производительность мельницы по исходному загружаемому материалу (q) и по вновь образованному расчетному классу (q_i):

$$q = \frac{60P}{T_0 V}; \quad (1)$$

$$q_i = q \frac{\beta_i - \alpha_i}{100}; \quad (2)$$

где P – масса твердого в загрузке, кг (принято $P = 3$ кг); T_0 – время измельчения (время отбора

пробы); V – объем мельницы, л; β_i и α_i – содержание i -го класса (по минусу) в готовой суспензии и в исходной загрузке, %.

Для моделирования процесса помола компонентов закладочной смеси использована лабораторная стержневая мельница, техническая характеристика которой представлена в табл. 3.

Выбор мельницы обусловлен необходимостью получения наилучшей текучести закладочной смеси при большем заполнении ее твердой фазой.

Экспериментально установлено оптимальное время измельчения в стержневой мельнице – 10 мин. Из мельницы брали пробу полученной смеси, далее ее высушивали и просеивали через сито № 0,14 (рис. 1). Начальное время помола составляло 5 мин, но в результате не была обеспечена требуемая степень помола (составила 65 %) по классу 0,14 мм. В мельнице для набора 55 кг мелющей загрузки потребовалось 30 стержней длиной 41 см и диаметром 2,0 – 2,7 см.

Перед опытами определяли подвижность (рис. 2) закладочной смеси тремя способами: на приборе Сутгарда – составила 18 – 20 см, на встряхивающем столике – 38 – 40 см, на стандартном конусе – 10 – 12 см. Эти данные показывают, что смесь является очень подвижной, литой.

Для исследования возможности по частичной (50 %) и полной (100 %) замене доменного граншлака на золу уноса Западно-Сибирской ТЭЦ, а также по частичной (10, 30 и 50 %) замене цемента на золу уноса для оценки прочности твердеющей закладки были изготовлены серии образцов в форме кубов со стороной 10 см, которые твердели в нормальных условиях (влажность 90 – 95 % и температура 18 – 20 °С) в течение 90 суток (рис. 3).

Прочность образцов определяли в соответствии с ГОСТ 21153.2 – 84, результаты представлены в табл. 4.

Необходимая прочность закладки (≥ 4 МПа) достигается даже при замене 50 % цемента золой уноса (табл. 4), при этом плотность закладочной смеси составляет более 2,0 г/см³. Вместе

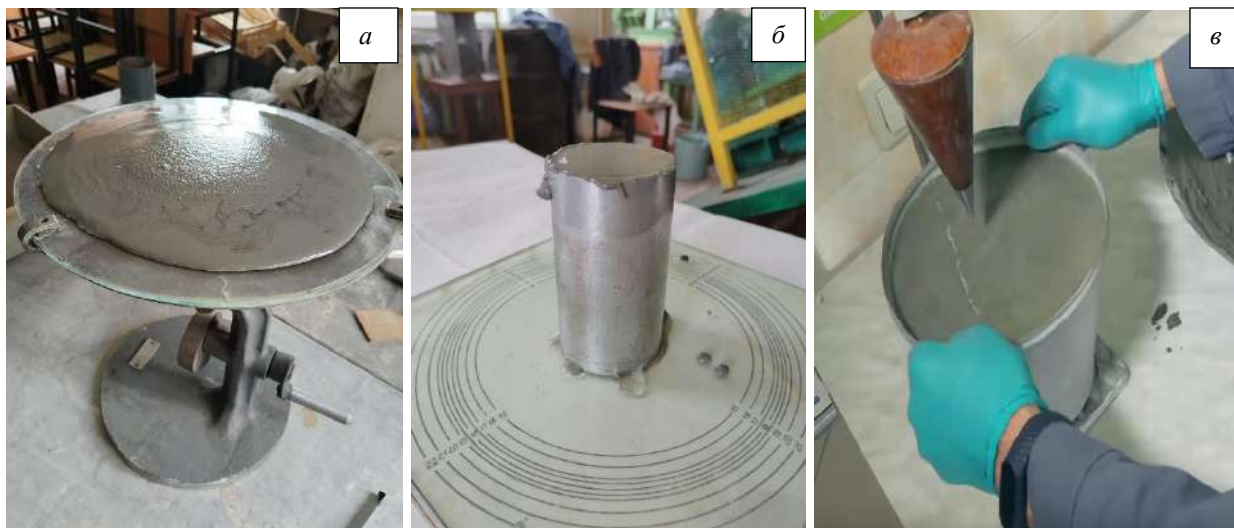


Рис. 2. Определение подвижности закладочной смеси на встряхивающем столике (а), на приборе Суттарда (б) и на стандартном конусе (в)
 Fig. 2. Determination of the mobility of the filling mixture on the shaking table (a), on the Souttard device (b) and on the standard cone (c)

с тем как частичная (50 %), так и полная замена доменного граншлака золой уноса не позволяют получить требуемую прочность закладочного массива. По-видимому, для повышения прочности требуется как увеличить расход заполнителя для повышения плотности закладочной смеси, так и оптимизировать гранулометрический состав закладки.

Выводы

Установлена возможность замены цемента (до 50 %) на золу уноса Западно-Сибирской ТЭЦ при подготовке закладочной смеси на Таштагольском руднике.

Установлена возможность применения стержневых мельниц на операции мокрого измельчения исходных материалов с получением требуемого гранулометрического состава и текучести готовой закладочной смеси.

Необходимо провести дополнительные исследования по оптимизации гранулометрического состава закладочной смеси с целью замены доменного гранулированного шлака.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Должиков П.Н., Пронский Д.В., Пронская Н.В. Исследования тампонажно-закладочных ресурсосберегающих смесей для ликвидации выработанного пространства. *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле.* 2023;4:590–598.
2. Кулагина Т.А., Хаглеев П.Е., Кулагин В.А. *Техносферная безопасность в теплоэнергетике. Топливоподготовка и золошлакоотвалы.* Москва: Русайнс, 2021;408.

3. Газиев У.А., Рахимов Ш.Т. Закладочные смеси с применением отходов горно-металлургического комбината Узбекистана. *Современное промышленное и гражданское строительство.* 2020;16(3):109–115.
4. Cao H., Gao Q., Zhang X., Guo B. Research progress and development direction of filling cementing materials for filling mining in iron mines of China. *Gels.* 2022;8;192. <https://doi.org/10.3390/gels8030192>
5. Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С., Хайрутдинов А.М. Бесцементные закладочные смеси на основе водорастворимых техногенных отходов. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* 2020;331(11)30–36.
6. Волков Е.П., Анушенков А.Н. *Разработка технологии закладки горных выработок*



Рис. 3. Твердение образцов
 Fig. 3. Hardening of samples

Результаты испытаний образцов закладочной смеси
Table 4. Test results of samples of the filling mixture

Доля замены на золу уноса, %	Расход материалов, кг (на замес)					Основные характеристики	
	Цемент	Доменный граншлак	Зола уноса	Заполнитель	Вода	Средняя плотность, г/см ³	Прочность при сжатии (в возрасте 90 суток)
Замена цемента							
10	0,162	1,87	0,018	5,62	2,33	2,108	4,25
30	0,126	1,87	0,054	5,62	2,33	2,065	4,18
50	0,090	1,87	0,090	5,62	2,33	2,051	4,09
Замена доменного граншлака							
50	0,180	0,93	0,930	5,62	2,33	1,930	3,26
100	0,180	0	1,870	5,62	2,33	1,840	2,45

литыми твердеющими смесями на основе хвостов обогащения. Красноярск: изд. Сиб. федер. ун-та, 2020;176.

7. Волков М.А., Гринюк А.П., Мурко В.И., Хмяляйнен В.А., Баёв Д.А. Подготовка тампонажных растворов на основе золошлаковых отходов при сжигании водугольного топлива из угольных шламов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;8:97–104. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-8-0-97-104>
8. Хайрутдинов М.М., Кузиев Д.А., Копылов А.Б., Головин К.А. Техногенные отходы в закладочных смесях – путь снижения воздействия на экологию. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2022;1:152–164.
9. Dong Y. *Study on the coordinated and comprehensive utilization of multiple solid waste resources in jinchuan mine filling mining*. Beijing University of Science and Technology. Beijing, China, 2019.
10. Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Габараев О.З., Вернигор В.В. Эффективность утилизации доступного сырья для изготовления твердеющих закладочных смесей. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2020;11-1:85–93.
11. Тюляева Ю.С., Ковалик Т., Рыбак А. Строительно-закладочные смеси на основе техногенных отходов. *Технологии бетонов*. 2021;2(175):45–51.
12. Стась Г.В., Урумова Ф.М., Небылова Я.Г., Чельдиева З.К. Концепция выбора составов бетонных смесей для подземного строительства при добыче руд. *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2020;9-10(260-261):45–50.
13. Shobeiri V., Bennett B., Xie T., Visintin P. Mix design optimization of concrete containing fly ash and slag for global warming potential and cost reduction. *Case Studies in Construction Materials*. 2023;18:e01832. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01832>
14. Perez J.A., Переа К.Г. Обоснование состава и параметров технологии цементной закладки на руднике Cerro lindo, Перу. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2023;4:68–78. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230408>
15. Varshney H. The possibility of replacement of cement by fly ash and glass powder. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*. 2020;07(03):516 – 523. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17991.73126>
16. Liang F., Yang X., Bian Z., Yang H., Gao Q. Experimental study on low cost green filling cementitious material. *Min. Res. Dev.* 2019;39:16–21.
17. Kinomura K., Ishida T. Enhanced hydration model of fly ash in blended cement and application of extensive modeling for continuous hydration to pozzolanic micro-pore structures. *Cem. Concr. Compos.* 2020;114:103733.
18. Murko V., Khyamyalyainen V., Baranova M. Use of ash-and-slag wastes after burning of fine-dispersed coal-washing wastes. *E3S Web of Conferences*. 2018;41:01042.
19. Giergiczny Z. *Fly ash and slag*. Silesian University of Technology. Gliwice, śląskie, Poland. 2019.
20. Ni W., Li Y., Xu C. Hydration mechanism of all solid waste cementitious materials from slag electric furnace reduction slag. *J. Cent. South Univ.* 2019;50:2342–2350.

REFERENCES

1. Dolzhikov P.N., Pronsky D.V., Pronskaya N.V. Studies of plugging and filling resource-saving mixtures for liquidation of the mined-out space. *Proceedings of Tula State University. Earth sciences*. 2023;4:590-598. (In Russ.).
2. Kulagina T.A., Hagleev P.E., Kulagin V.A. *Technosphere safety in thermal power engineering. Fuel treatment and ash and slag dumps*. Moscow: Rusains, 2021;408. (In Russ.).
3. Gaziev U.A., Rakhimov Sh.T. Filling mixtures using waste from the mining and metallurgical combine of Uzbekistan. *Modern industrial and civil engineering*. 2020;16(3):109–115. (In Russ.).
4. Cao H., Gao Q., Zhang X., Guo B. Research progress and development direction of filling cementing materials for filling mining in iron mines of China. *Gels*. 2022;8:192. <https://doi.org/10.3390/gels8030192>
5. Khairutdinov M.M., Kongar-Suryun Ch.B., Tyulyaeva Yu.S., Khairutdinov A.M. Cement-free filling mixtures based on water-soluble technogenic waste. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 2020;331(11)30-36. (In Russ.).
6. Volkov E.P., Anushenkov A.N. *Development of technology for laying mine workings with cast hardening mixtures based on enrichment tailings*. Krasnoyarsk: Publishing House of the Siberian Federal University. Univ., 2020;176. (In Russ.).
7. Volkov M.A., Grinyuk A.P., Murko V.I., Khamalyainen V.A., Baev D.A. Preparation of grouting solutions based on ash and slag waste during the combustion of coal-water fuel from coal sludge. *Mining information and analytical bulletin*. 2020;8:97–104. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-8-0-97-104>
8. Khairutdinov M.M., Kuziev D.A., Kopylov A.B., Golovin K.A. Technological waste in laying mixtures – a way to reduce the impact on the environment. *Proceedings of Tula State University. Earth Sciences*. 2022;1:152–164. (In Russ.).
9. Dong Y. Study on the Coordinated and Comprehensive Utilization of Multiple Solid Waste Resources in Jinchuan Mine Filling Mining. Beijing University of Science and Technology. Beijing, China, 2019.
10. Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Gabaraev O.Z., Vernigor V.V. Efficiency of utilization of available raw materials for the manufacture of hardening filling mixtures. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2020;11-1:85–93. (In Russ.).
11. Tyulyaeva Yu.S., Kovalik T., Rybak A. Construction and laying mixtures based on man-made waste. *Concrete technologies*. 2021;2(175):45–51. (In Russ.).
12. Stas G.V., Urumova F.M., Nebylova Ya.G., Cheldieva Z.K. The concept of choosing concrete mixtures for underground construction during ore mining. *Construction materials, equipment, technologies of the XXI century*. 2020;9-10(260-261):45–50. (In Russ.).
13. Shobeiri V., Bennett B., Xie T., Visintin P. Mix design optimization of concrete containing fly ash and slag for global warming potential and cost reduction. *Case Studies in Construction Materials*. 2023;18:e01832. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01832>
14. Perez L.A., Perea K.G. Substantiation of the composition and parameters of cement laying technology at the Cerro lindo mine, Peru. *Physical and technical problems of mining*. 2023;4:68–78. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20230408>
15. Varshney H. The possibility of replacement of cement by fly ash and glass powder. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*. 2020;07(03):516 – 523. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17991.73126>
16. Liang F., Yang X., Bian Z., Yang H., Gao Q. Experimental study on low cost green filling cementitious material. *Min. Res. Dev.* 2019;39:16–21.
17. Kinomura K., Ishida T. Enhanced hydration model of fly ash in blended cement and application of extensive modeling for continuous hydration to pozzolanic micro-pore structures. *Cem. Concr. Compos.* 2020;114:103733.
18. Murko V., Khyamyalyainen V., Baranova M. Use of Ash-and-Slag Wastes after Burning of Fine-Dispersed Coal-Washing Wastes. *E3S Web of Conferences*. 2018;41:01042.
19. Giergiczny Z. *Fly ash and slag*. Silesian University of Technology. Gliwice, Śląskie, Poland. 2019.
20. Ni W., Li Y., Xu C. Hydration mechanism of all solid waste cementitious materials from slag electric furnace reduction slag. *J. Cent. South Univ.* 2019;50:2342–2350.

Сведения об авторах

Василий Иванович Мурко, д.т.н., профессор, директор Центра инновационных угольных технологий, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: sib_eco@mail.ru

SPIN-код: 1092-6052

Ирина Владимировна Спиридонова, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой инженерных конструкций, строительных технологий и материалов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: sp1ridonova-iv@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-9965-5765

SPIN-код: 8682-9406

Илья Дмитриевич Селиванов, магистрант кафедры инженерных конструкций, строительных технологий и материалов, Сибирский государственный индустриальный университет

Information about the authors:

Vasilii I. Murko, Dr. Sci. (Eng.), professor, director of the Center for innovative coal technologies, Siberian State Industrial University

E-mail: sib_eco@mail.ru

SPIN-код: 1092-6052

Irina V. Spiridonova, Cand. Sci. (Eng.), associate professor, head of the Department of engineering structures, construction technologies and materials, Siberian State Industrial University

E-mail: sp1ridonova-iv@yandex.ru

ORCID: 0000-0002-9965-5765

SPIN-код: 8682-9406

Ilya D. Selivanov, master's student of the Department of engineering structures, construction technologies and materials, Siberian State Industrial University

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 15.11.2023

После доработки 28.02.2024

Принята к публикации 06.03.2024

Received 15.11.2023

Revised 28.02.2024

Accepted 06.03.2024

Оригинальная статья

УДК 669.715

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-111-119

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ НА СПОСОБНОСТЬ ЛИСТОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 3005 К ГИБОЧНЫМ ОПЕРАЦИЯМ

© 2024 г. А. В. Трибунский

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34)

Аннотация. Проведен анализ кристаллографической текстуры поверхности изгиба листов из алюминиевого сплава 3005 в холоднокатаном и отожженном состояниях при гибке с углом 180° . С помощью диаграмм Парето выявлены текстуры, оказывающие наибольшее влияние на способность листов к гибочным операциям. Установлено, что при отжиге листов алюминиевого сплава 3005 толщиной 0,25, 0,46 и 0,82 мм с суммарной степенью деформации 92,9, 88,5 и 85,1 % соответственно происходит почти двукратное увеличение бестекстурной составляющей с аналогичным уменьшением объемных долей других кристаллографических текстур. Предложен метод количественной оценки штампуемости в зависимости от рельефа поверхности изгиба. Методика заключается в анализе не менее пятидесяти образцов поверхностей изгиба для определения основных повторяющихся типов рельефа поверхности изгиба. Для каждого типа рельефа определены условные баллы штампуемости. Принято, что максимально возможный балл штампуемости 10 баллов – это рельеф с гладкой поверхностью в месте изгиба, где отсутствуют дефекты «апельсиновая корка» и трещины, а минимальный балл штампуемости 0 баллов – рельеф со сквозными трещинами по всему изгибу. Все остальные сочетания, с единичными несквозными трещинами и волнистостью в виде «апельсиновой корки» с различной высотой волны, будут находиться между двумя этими вариантами. Установлено, что с уменьшением толщины образцов происходит уменьшение балла штампуемости. Значительное влияние на штампуемость оказывает термическая обработка: штампуемость образцов толщиной 0,46 и 0,82 мм после отжига увеличивается в три раза, образцов толщиной 0,25 мм – в два раза.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, кристаллографическая текстура, гибка, штампуемость, рельеф поверхности изгиба, диаграммы Парето

Для цитирования: Трибунский А.В. Исследование влияния кристаллографической текстуры на способность листов из алюминиевого сплава 3005 к гибочным операциям. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024; 1(47):111–119. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-111-119](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-111-119)

Original article

STUDY OF THE INFLUENCE OF CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE ON 3005 ALUMINUM ALLOY SHEETS BENDING ABILITIES

© 2024 A. V. Tribunskii

Samara National Research University (34 Moskovskoe Route, Samara 443086, Russian Federation)

Abstract. The analysis of the crystallographic texture of the bending surface of 3005 aluminum alloy sheets was carried out in both cold-rolled and annealed states during the process of 180° sheet bending. Textures with the greatest impact on sheet bending abilities were identified using the Pareto diagram. The study shows that annealing of aluminum alloy 3005 sheets with thicknesses of 0.25, 0.46, and 0.82 mm and total strain rates of 92.9, 88.5, and 85.1 % results in an almost twofold increase in the component without texture with a similar decrease in the

volume fractions of other crystallographic textures. The author proposes a method for quantitative estimation of forging ability depending on the relief of the bending surface. Conditional forging ability points were determined for each type of relief. The maximum possible forging ability score of 10 points was the relief with a smooth surface at the bend, where there were no “orange peel” defects as well as cracks, and the minimum forging ability score of 0 points was the relief with through-cracks all over the bend. It was found that the decrease in thickness of the samples was producing a decrease in the forging ability score. In addition, it was found that heat treatment had a great influence on the forging ability: the forging ability for the samples 0.46 mm and 0.82 mm thick increased three times after annealing, and for the samples 0.25 mm thick, it increased two times.

Keywords: aluminium alloys, crystallographic texture, bending, stamping, bending surface relief, Pareto diagrams

For citation: Tribunskiy A.V. Study of the influence of crystallographic texture on 3005 aluminum alloy sheets bending abilities. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024; 1(47):111–119. (In Russ.) [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-111-119](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-111-119)

Введение

Выбор алюминиевого сплава 3005 системы Al – Mn в качестве объекта исследования связан с тем, что указанный листовый деформируемый сплав за счет хорошей пластичности и коррозионной стойкости, а также свариваемости и высокой усталостной прочности широко используется для получения элементов строительных и декоративных конструкций [1]. Процесс изготовления таких конструкций подразумевает проведение гибки полос и лент, в том числе применяется изгиб с углом 180° , то есть складывание заготовки до смыкания полок. В процессе листовой штамповки и гибки сплавов этой серии возникают различные дефекты, такие как боковые трещины [2] или гофрообразование между полками гнутой заготовки. Потеря пластичности может быть связана с упрочнением в результате нагартовки [3], проявлением размерного эффекта или выделения дисперсных фаз [4], а также с особенностью кристаллографической текстуры. Для снижения стоимости алюминиевых конструкций производители стремятся снизить их массу за счет уменьшения толщины элементов конструкции, что, в свою очередь, приводит к снижению пластических свойств [5], и, как следствие, к снижению технологичности в операциях листовой штамповки, что повышает вероятность появления трещин в месте сгиба.

Снижение штампуемости листов из алюминиевых сплавов с уменьшением их толщины может быть связано с особенностями их структуры, такими как размер зерна и разнородность, кристаллографическая текстура, наличие упрочняющих фаз. В фазовый состав сплава 3005 входит вторичная фаза $MnAl_6$, которая может снижать пластичность и способствовать образованию трещин. Также марганец образует с железом интерметаллические соединения, в присутствии железа вместо $MnAl_6$ образуется сложная фаза $Al_6(MnFe)$ в виде крупных пластин, практически нерастворимая в алюминии, что повышает кон-

центрацию напряжений при изгибе и снижает пластичность и технологичность [6]. Главный недостаток легирования марганцем – существенный рост зерна при нагреве [7]. Повышенное содержание кремния ухудшает деформируемость сплавов на основе алюминия, так как понижается его пластичность. Для снижения негативного влияния железа и кремния стараются в сплаве выдерживать соотношение $Fe:Si = 1,3:1,5$ [8]. Пониженная пластичность сплавов может быть связана с наличием внутренних напряжений, как представлено в работе [9].

Для сплавов с низким содержанием легирующих элементов [10] одной из значимых особенностей структуры [11] является кристаллографическая текстура [12], влияние которой на штампуемость представлено в работе [13].

Существует ряд стандартизированных методик для оценки штампуемости: технологические испытания на выдавливание сферической лунки [14], глубокая вытяжка цилиндрического стаканчика, изгиб [15] и другие. Традиционным для оценки пригодности листов к гибочным операциям является испытание на перегиб [16], где оценивается рельеф поверхности, но это проходит на качественном уровне. Для количественной оценки пригодности листового алюминия к гибочным операциям в данном исследовании предлагается выполнить оценку штампуемости следующим образом: если при перегибе не происходит изменения рельефа, то есть он остается гладким, будем полагать, что это хорошая штампуемость, лист обладает хорошей пригодностью к гибочным операциям, балл штампуемости максимальный и равен 10. При появлении на изгибе большого количества трещин, в том числе сквозных, будем считать, что пригодность к операциям гибки низкая и будем присваивать этой штампуемости 0 баллов. Все остальные сочетания, с единичными несквозными трещинами и волнистостью в виде «апельсиновой корки» с различной высотой волны, будут находиться между двумя этими вариантами.

Цель настоящей работы – изучение влияния кристаллографической текстуры листов из алюминиевого сплава 3005 с различной степенью деформации при холодной прокатке на изгиб с углом 180° , разработка методики количественной оценки штампуемости, пригодности к гибочным операциям.

Для исследования влияния кристаллографических текстур на способность листов из алюминиевого сплава 3005 к гибочным операциям были определены текстуры в месте сгиба с различной степенью деформации при холодной прокатке листов толщиной 0,25, 0,46 и 0,82 мм в холоднокатаном и отожженном состояниях, режимы отжига для сплава 3005 выбирали по данным работы [17]. С помощью диаграмм Парето выявлены текстуры, оказывающие наибольшее влияние на штампуемость. Для оценки штампуемости по описанной в работе [18] методике выполнены испытания на изгиб с углом 180° , произведена классификация рельефа поверхности изгиба листов, выделены основные типы рельефов, предложен метод количественной оценки штампуемости в зависимости от типа рельефа в месте изгиба.

Методы и принципы исследования

При проведении исследований применяли образцы в виде листов из алюминиевого сплава 3005 (химический состав согласно EN 573-3 и механические свойства согласно EN 485-2). Образцы металла толщиной 0,25, 0,46 и 0,82 мм отбирали после холодной прокатки со степенью деформации 92,9, 88,5 и 85,1 % соответственно.

Образцы исследовали в холоднокатаном и отожженном состояниях. Режимы отжига выбирали на основании традиционных рекомендаций термической обработки [17]. Отжиг образцов выполнен в садочных воздушно-циркуляционных печах при температуре 270°C в течение 1 ч.

Технологические испытания на перегиб [18] проводили в соответствии с ГОСТ 14019 – 80, подробное изложение проведения данного исследования представлено в работе [19].

Текстурные измерения в виде построения полюсных фигур проводили на образцах, вырезанных из листов, в месте изгиба. Плоскость съемки полюсных фигур параллельна плоскости прокатки. Текстуры исследованы методом «на отражение» с использованием рентгеновского дифрактометра ДРОН-7 в $\text{Co } k_\alpha$ -излучении, диапазоны углов наклона α ($0 - 70^\circ$) и поворотов β ($0 - 360^\circ$) с шагом по α и β 5° . Далее рассчитывали прямые и обратные полюсные фигуры для трех взаимно перпендикулярных направлений прокатки (НП).

Построение диаграмм Парето часто используется в экономике для выбора наиболее выгодных условий для получения необходимых результатов. В них заложена закономерность 80/20 или принцип Парето, выявленный в 1897 году итальянским экономистом Парето, согласно которому 20 % усилий дают 80 % результата [20]. В представленном исследовании этот подход позволил выявить кристаллографические текстуры, оказывающие наибольшее влияние на способность листов толщиной менее 1 мм к гибочным операциям.

Количественную оценку штампуемости проводили с помощью балльной системы оценки рельефа поверхности изгиба, для этого был проведен визуальный осмотр места изгиба образцов металла толщиной 0,25, 0,46 и 0,82 мм в холоднокатаном и отожженном состояниях с применением лупы, стереомикроскопа и USB-камеры с увеличением до 20 крат. Методика заключается в анализе не менее 50 образцов поверхностей изгиба для определения основных повторяющихся типов рельефа поверхности изгиба. Для каждого типа рельефа определены условные баллы штампуемости. Принято, что максимально возможный балл штампуемости (10 баллов) – это рельеф с гладкой поверхностью в месте изгиба, где отсутствуют дефекты «апельсиновая корка» и трещины, а минимальный балл (0 баллов) – рельеф со сквозными трещинами по всему изгибу. При этом волнистости с меньшей высотой волны будет присвоен более высокий балл, чем волнистости с большей высотой волны, а наличие трещин будет приводить к снижению балла штампуемости. В таблице представлен принцип распределения баллов штампуемости листов толщиной 0,25, 0,46 и 0,82 мм из алюминиевого сплава 3005 в зависимости от характера рельефа поверхности изгиба.

Основные результаты и их обсуждение

На рис. 1 в виде круговых диаграмм представлены основные ориентировки и их объемные доли для образцов из сплава 3005 толщиной 0,25, 0,46 и 0,82 мм после холодной прокатки (а) и отжига (б). В холоднокатаном состоянии и после отжига на образцах всех исследуемых толщин преобладает бестекстурная составляющая. При этом после отжига объемная доля бестекстурной составляющей возрастает в два раза. Остальные ориентировки идут в порядке убывания: для холоднокатаных образцов $S^{*2}(341)$ <4-58>, $\text{Ba}'(493)$ <5-47>, $\text{Bs}(110)$ <1-12>, $S''(385)$ <7-54>, $\text{Cu}'(113)$ <-6-65>; для образцов после отжига $S^{*2}(341)$ <4-58>, $\text{Ba}'(493)$ <5-47>, $\text{Cu}''(449)$ <-6-65>, $\text{Bs}(110)$ <1-12>.

Распределение баллов пригодности листов толщиной 0,25, 0,46 и 0,82 мм из алюминиевого сплава 3005 после холодной прокатки и отжига к операции гибки с углом 180°
Score scale for 180° bending suitability of the 3005 aluminum alloy sheets with thickness 0.25, 0.46, 0.82 mm after cold rolling and annealing

Балл пригодности листов к операции гибки	Описание характера рельефа изгиба
0 – 1	Глубокие и сквозные трещины
2 – 3	«Апельсиновая корка» с высокой волнистостью и единичными несквозными трещинами
4 – 6	«Апельсиновая корка» со средней высотой волны без трещин
7 – 8	«Апельсиновая корка» с низкой высотой волны без трещин
9 – 10	Гладкая поверхность

На рис. 2 представлены диаграммы ранжирования основных ориентировок кристаллографических текстур образцов из сплава 3005 толщиной 0,25, 0,46 и 0,82 мм после холодной прокатки (а) и отжига (б) в порядке убывания их объемных долей.

В холоднокатаном состоянии определяющую долю, занимающую более 80 % от суммы полюсных плотностей, занимают три ориентировки (бестекстурная, $S^{2(341)}\langle 4-58 \rangle$ и $Bs(110)\langle 1-12 \rangle$), а на отожженных образцах ключевую роль, составляющую 60 % от объемной доли всех кристаллографических текстур, играет бестекстурная составляющая.

На рис. 3 представлены диаграммы зависимости плотности основных ориентировок текстуры и штампуемости от толщины образцов после холодной прокатки и отжига. С уменьшением толщины образцов после холодной прокатки доли бестекстурной составляющей и текстуры $S^{2(341)}\langle 4-58 \rangle$ практически не меняются, доля текстуры $Va(493)\langle 5-47 \rangle$ незначительно уменьшается, а текстуры $Bs(110)\langle 1-12 \rangle$ увеличиваются (рис. 3, а). Снижение почти до нуля доли ориентировки $S(385)\langle 7-54 \rangle$ и рост объемной доли текстуры $Bs(110)\langle 1-12 \rangle$ при толщине листа 0,25 мм приводит к снижению способности к гибочным операциям в 2,8 раза.

Для образцов после отжига (рис. 3, б) с уменьшением толщины образцов также практически не меняются доли бестекстурной составляющей и текстуры $S^{2(341)}\langle 4-58 \rangle$, доля текстуры $Va(493)\langle 5-47 \rangle$ уменьшается, а текстуры $S(385)\langle 7-54 \rangle$ и $Cu(449)\langle 6-65 \rangle$ – увеличивается. Стоит отметить, что после отжига полностью пропала текстура $S(385)\langle 7-54 \rangle$, а доля $Bs(110)\langle 1-12 \rangle$ резко снижается по сравнению с холоднокатаным состоянием образцов всех толщин.

На рис. 4 представлены значения баллов штампуемости, рассчитанные по предложенной методике для образцов из сплава 3005 толщиной

0,25, 0,46 и 0,82 мм после холодной прокатки и отжига.

Для лент из алюминиевого сплава 3005 толщиной менее 1 мм отжиг положительно влияет на пригодность металла к операциям гибки. Стоит отметить, что для лент толщиной 0,46 и 0,82 мм после отжига штампуемость увеличивается почти в три раза, а для лент толщиной 0,25 мм увеличение менее выражено: только в два раза.

Выводы

Предложен способ количественной оценки штампуемости в зависимости от рельефа поверхности изгиба, который позволил количественно оценить и выявить изменение пригодности тонких листов к гибочным операциям в зависимости от степени холодной пластической деформации и отжига. Увеличение степени обжатия от 85 до 92 % при холодной прокатке приводит к снижению штампуемости в 1,35 раза. В результате отжига штампуемость возрастает, но с уменьшением толщины листа эта способность к восстановлению штампуемости снижается в 1,5 раза.

При отжиге независимо от толщины образцов происходит почти двукратное увеличение бестекстурной составляющей с 35 до 60 %. Распределение полюсной плотности в порядке убывания: для холоднокатаных образцов – бестекстурная составляющая, $S^{2(341)}\langle 4-58 \rangle$, $Va(493)\langle 5-47 \rangle$, $Bs(110)\langle 1-12 \rangle$, $S(385)\langle 7-54 \rangle$, $Cu(113)\langle 6-65 \rangle$; для отожженных образцов – бестекстурная составляющая, $S^{2(341)}\langle 4-58 \rangle$, $Va(493)\langle 5-47 \rangle$, $Cu(449)\langle 6-65 \rangle$, $Bs(110)\langle 1-12 \rangle$.

В холоднокатаном состоянии определяющую долю, занимающую более 80 % от суммы полюсных плотностей, занимают три ориентировки: бестекстурная, $S^{2(341)}\langle 4-58 \rangle$ и $Bs(110)\langle 1-12 \rangle$, а на отожженных образцах ключевую роль, которая составляет 60 % от объемной доли всех кристаллографических текстур, играет бестекстурная составляющая. Выявлено, что исчезно-

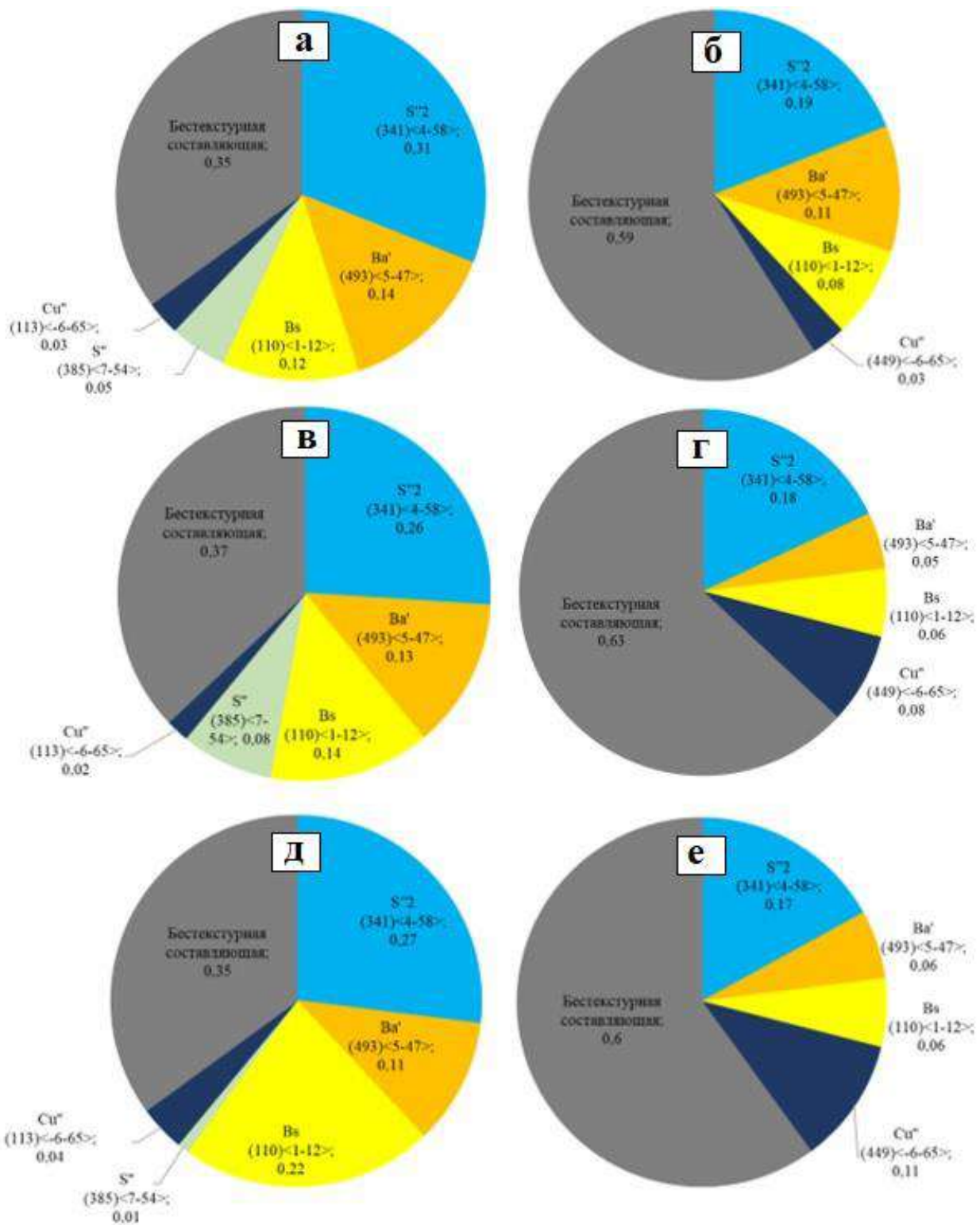


Рис. 1. Основные ориентировки и их объемные доли для образцов из сплава 3005 толщиной 0,25 мм (а, б), 0,46 мм (в, г), 0,82 мм (д, е) после холодной прокатки (а, в, д) и после отжига (б, г, е)
 Fig. 1. Main orientations and their volume fractions of samples from 3005 aluminum alloys with thickness 0.25 mm (a, б), 0.46 mm (в, г), 0.82 mm (д, е) after cold rolling (а, в, д) and after annealing (б, г, е)

вление ориентировки S''(385)<7-54> и рост объемной доли текстуры Bs(110)<1-12> на холоднокатаных листах толщиной 0,25 мм приводит к снижению способности к гибочным операциям в 2,8 раза. Стоит отметить, что кристаллографическая текстура S''(385)<7-54> полностью исчезает

после отжига, а Bs(110)<1-12> значительно снижается по сравнению с холоднокатаным состоянием, что определенно приводит к росту штампуемости.

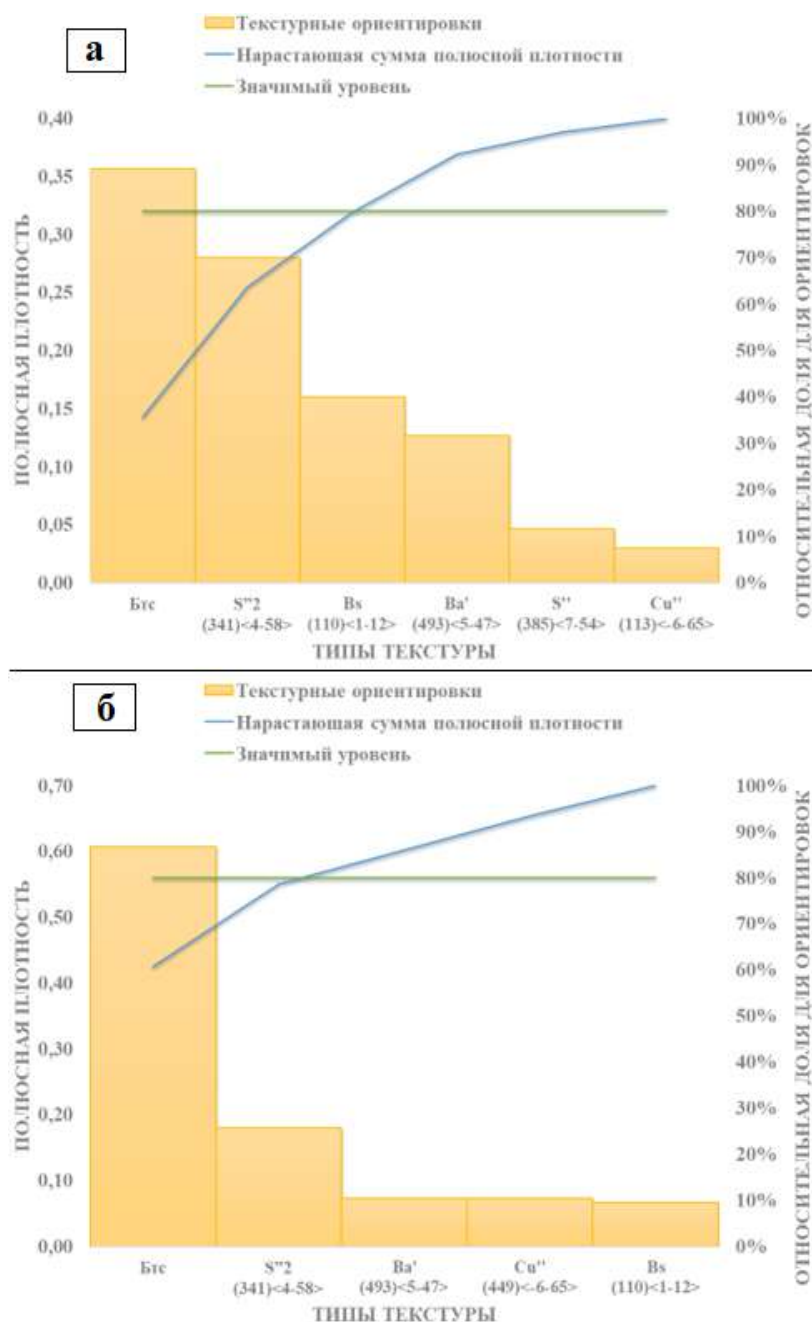


Рис. 2. Ранжирование основных ориентировок текстуры образцов из сплава 3005 толщиной 0,25, 0,46 и 0,82 мм после холодной прокатки (а) и отжига (б)
 Fig. 2. Ranking of the main texture orientations of samples from 3005 aluminum alloys with thickness 0.25, 0.46 and 0.82 mm after cold rolling (a) and annealing (b)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богодухов С.И., Сулейманов Р.М., Проскурин А.Д. *Технологические процессы в машиностроении*. Москва: Машиностроение. 2021:640.
2. Grechnikov F.V., Gorshkov Yu.S., Erisov Ya.A. Bending Process Simulation of a Flat Workpiece with Various Cross-Sectional Mechanical Properties with PAM-STAMP 2G. *Key Engineering Materials*. 2016;685:133–136.
3. Nosova E.A., Erisov Ya.A., Grechnikov F.V. Multi-Cycle Rolled Aluminum Al alloy 3103 Sandwiches. *Mechanical Properties and Stamp Ability*. 2017;129.
4. Peng J.-F., Liu J.-H., Cai Z.-B. Study on bending fretting fatigue damages of 7075 aluminum alloy. *Tribology International*. 2013;59:38–46. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.06.016>
5. Гуляев А.П., Гуляев А.А. *Материаловедение*. Москва: ИД Альянс, 2024;44. EDN:URZRDR.
6. Таубкин М.Д. *Цветные металлы и сплавы: справочник в 2 т*. Москва: Металлургия, 1987;210.

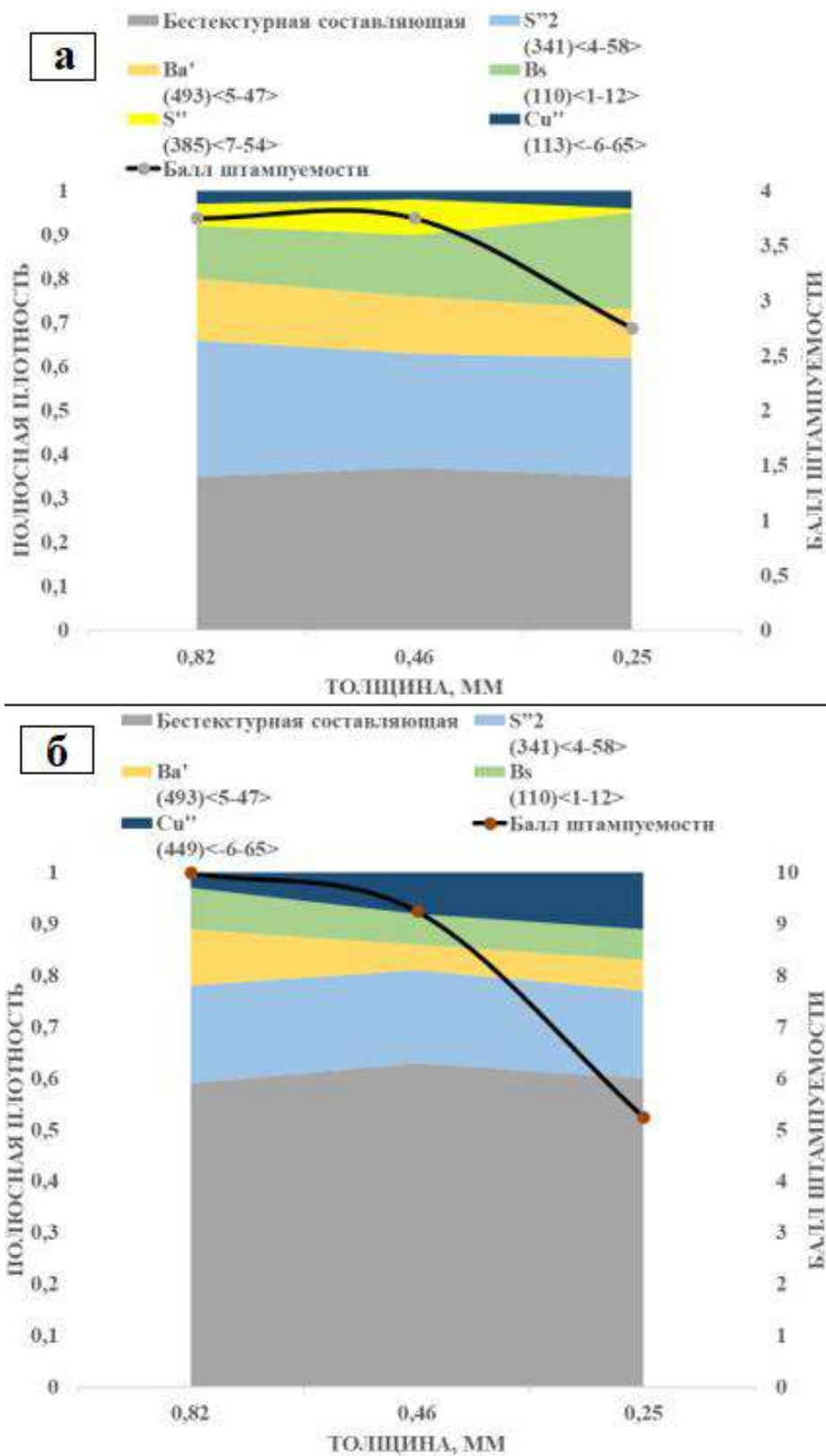


Рис. 3. Диаграммы зависимости плотности основных ориентировок текстуры и штампуемости от толщины образцов после холодной прокатки (а) и отжига (б)

Fig. 3. Diagrams of dependence of the main texture orientations density and forging ability on the thickness of samples after cold rolling (a) and annealing (b)

7. Рогельберг И.Л., Шпичинецкий Е.С. Диаграммы рекристаллизации металлов и сплавов: справочник. Москва: Металлургиздат, 1950;280.
8. Aryshenskii E.V., Kavalla R., Aryshenskii V.Yu., Shmidt K. Investigation of texture and structure evolution during hot rolling of 1070, 3104 and 8011 aluminum

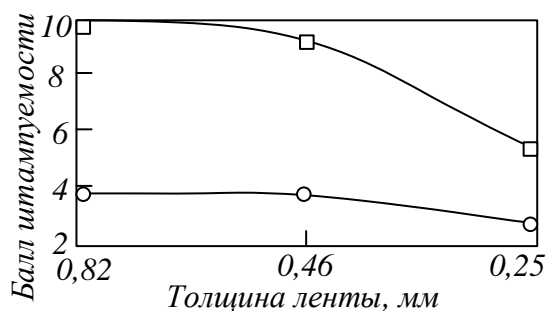


Рис. 4. Баллы штампваемости листов толщиной 0,25, 0,46 и 0,82 мм из сплава 3005 после холодной прокатки (○) и отжига (□)

Fig. 4. Forging ability score of the 3005 aluminum alloy sheets with thickness 0.25, 0.46 and 0.82 mm after cold rolling (○) and annealing (□)

alloys in continuous mill. *Metallurgia Italiana*. 2017;109(3):11–21.

9. Vais M. Effect of residual stress on the bending of aluminium. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012;212(4):877–883.
10. Гречников Ф.В., Ерисов Я.А., Сурудин С.В., Разживин В.А. Исследование влияния степени обжатия при холодной прокатке и температуры окончательного отжига на свойства и микроструктуру листов из сплава системы Al – Mg – Sc. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2022;28(4):75–83. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2022-4-75-83>; EDN: SEYADY.
11. Ерисов Я.А., Гречников Ф.В., Сурудин С.В., Разживин В.А. Исследование влияния кристаллографической текстуры на кривые предельных деформаций листовых заготовок. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2020;22(2(94)):118–123. <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2020-22-2-118-123>; EDN: UAQWSE.
12. Гречников Ф.В., Ерисов Я.А., Сурудин С.В., Петров И.Н. Исследование изменения пластической анизотропии и кристаллографической структуры на различных этапах производства листов из технического алюминия. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2020;22(2(94)):5–10. <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2020-22-2-5-10>; EDN: HBNEYN.
13. Бецофен С.Я., Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Долгова М.И., Кабанова Ю.А. Исследование фазового состава, текстуры и анизотропии свойств листов из сплавов системы Al – Cu – Li – Mg. *Деформация и разрушение материалов*. 2017;1:24–30. EDN:XIMGVJ.
14. ГОСТ 10510 – 80. Металлы. Метод испытания на выдавливание листов и лент по Эриксену (с Изменениями № 1, 2). Москва: Издательство стандартов, 1993:3.

15. ГОСТ 14019 – 2003. Материалы металлические. Метод испытания на изгиб. Москва: Стандартинформ, 2006:2.
16. ГОСТ 13813 – 68. Металлы. Метод испытания на перегиб листов и лент толщиной менее 4 мм (с Изменениями № 1, 2). Москва: ИПК Издательство стандартов, 1999:3.
17. Кишкина С.И., Фридляндер И.Н. *Справочник в 9 т. 6-е изд., перераб. и доп.* / Под ред. Р.Е. Шалина. Москва: ОНТИ, 1982:625.
18. Трибунский А.В., Носова Е.А. Влияние толщины на штампваемость листовых алюминиевых сплавов В кн.: *XV Королевские чтения: междунар. молодеж. науч. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения Д.И. Козлова* / Под общ. ред. М.А. Шлеенкова. Самара: АНО «Издательство СНЦ». 2019;1:138–139. EDN: ХНКYLX.
19. Трибунский А.В., Читнаева Е.С., Хисравов А.Ш., Вышкина А.С. Влияние кристаллографической текстуры алюминиевого сплава 3005 на изгиб. *Ползуновский вестник*. 2020;2:160–164. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.030>; EDN: ТЕСРДК.
20. Носова Е.А., Амосов А.П. Применение энтропийного подхода для оценки доли влияния структурных особенностей на штампваемость алюминиевых сплавов. *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2022;19(1):93–105. <https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.011>. EDN: OWHBQW.

REFERENCES

1. Bogodukhov S.I., Suleimanov R.M., Proskurin A.D. *Technological processes in mechanical engineering: textbook for universities*. Moscow: Mashinostroenie, 2021:640. (In Russ.).
2. Grechnikov F.V., Gorshkov Y.S. Erisov Ya.A. Bending Process Simulation of a Flat Workpiece with various Cross-Sectional Mechanical Properties with PAM-STAMP 2G. *Key Engineering Materials*. 2016;685:133–136.
3. Nosova E.A., Erisov Ya.A., Grechnikov F.V. Multi-Cycle Rolled Aluminum Alloy 3103 Sandwiches. Mechanical Properties and Stamp Ability. 2017;129.
4. Peng J.-F., Liu J.-H., Cai Z.-B. Study on bending fretting fatigue damages of 7075 aluminum alloy. *Tribology International*. 2013. № 59. С. 38–46.
5. Gulyaev A.P., Gulyaev A.A. *Materials Science: Textbook for universities. 7th ed., reprint. and add.* Moscow: ID Al'yans. 2024:644. (In Russ.).
6. Taubkin M.D. Non-ferrous metals and alloys: handbook in 2 volumes. Moscow: Metallurgy, 1987;210.7. (In Russ.).
7. Rogelberg I.L., Shpichinetsky E.S. *Diagrams of recrystallization of metals and alloys: hand-*

- book. Moscow: Metallurgizdat, 1950;280. (In Russ.).
8. Aryshenskii E.V., Kavalla R., Aryshenskii V.Yu., Shmidt K. Investigation of texture and structure evolution during hot rolling of 1070, 3104 and 8011 aluminum alloys in continuous mill. *Metallurgia Italiana*. 2017;109(3):11–21.
 9. Vais M. Effect of residual stress on the bending of aluminium. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012;212(4):877–883.
 10. Grechnikov F.V., Erisov Ya.A., Surudin S.V., Razzhivin V.A. Effect of reduction ratio during cold rolling and final annealing temperature on the properties and microstructure of Al – Mg – Sc alloy sheets. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2022;28(4):75–83. (In Russ.)
<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2022-4-75-83>; EDN: SEYADY.
 11. Erisov Ya.A., Grechnikov F.V., Surudin S.V., Razzhivin V.A. Investigation of the effect of crystallographic texture on the curves of extreme deformations of sheet blanks. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2020;22(2(94)):118–123.
<https://doi.org/10.37313/1990-5378-2020-22-118-123>; EDN: UAQWSE. (In Russ.).
 12. Grechnikov F.V., Erisov Ya.A., Surudin S.V., Petrov I.N. Investigation of changes in plastic anisotropy and crystallographic structure at various stages of the production of technical aluminum sheets. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2020;22(2(94)):5–10. (In Russ.)
<https://doi.org/10.37313/1990-5378-2020-22-2-5-10>; EDN: HBNEYN.
 13. Betsofen S.Ya., Antipov V.V., Serebrennikova N.Yu., Dolgova M.I., Kabanova Yu.A. Investigation of the phase composition, texture and anisotropy of the properties of sheets made of alloys of the Al – Cu – Li – Mg system. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 2019;1:24–30. EDN: XIMGVJ. (In Russ.).
 14. Metals. Test method for extrusion of sheets and tapes according to Eriksen (with Amendments No. 1, 2). GOST 10510 – 80. Moscow: Publishing House of Standards, 1993:3. (In Russ.).
 15. The materials are metallic. Bending test method. GOST 14019 – 2003. Moscow: Standartinform, 2006:2. (In Russ.).
 16. Metals. Test method for bending sheets and tapes with a thickness of less than 4 mm (with Amendments No. 1, 2). GOST 13813 – 68. Moscow: IPK Publishing House of Standards, 1999:3. (In Russ.).
 17. Kishkina S.I., Fridlyander I.N. *The handbook is in 9 volumes. 6th ed., reprint. and add.* R.E. Shalina ed. Moscow: ONTI, 1982:625. (In Russ.).
 18. Tribunskii A.V., Nosova E.A. The effect of thickness on the stampability of aluminum sheet alloys. In: *XV Royal Readings: international. youth. scientific conf., dedicated. The 100th anniversary of the birth of D.I. Kozlov*, M.A. Shleenkov ed.. Samara: ANO «Izdatel'stvo SNTs», 2019;1:138–139. EDN: XHKYLX. (In Russ.).
 19. Tribunskii A.V., Chitnaeva E.S., Khisravov A.Sh., Vyshkina A.S. The effect of the crystallographic texture of aluminum alloy 3005 on bending. *Polzunovskii vestnik*. 2020;2:160–164.
<https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2020.02.030>; EDN: TECPKD. (In Russ.).
 20. Nosova E.A., Amosov A.P. The use of an entropy approach to assess the proportion of the influence of structural features on the stampability of aluminum alloys. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya*. 2022;19(1):93–105.
<https://doi.org/10.25712/ASTU.1811-1416.2022.01.011>. EDN: OWHBQW. (In Russ.).

Сведения об авторах

Александр Викторович Трибунский, инженер кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

E-mail: tribunsky.alexander@mail.ru

ORCID: 0009-0000-6881-1561

SPIN-код: 3331-2696

Information about the authors:

Alexander V. Tribunskii, engineer of the Department of Metals Technology and Aviation Materials, Samara National Research University

E-mail: tribunsky.alexander@mail.ru

ORCID: 0009-0000-6881-1561

SPIN-код: 3331-2696

Поступила в редакцию 06.12.2023

После доработки 27.02.2024

Принята к публикации 04.03.2024

Received 06.12.2023

Revised 27.02.2024

Accepted 04.03.2024

Original article

УДК

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-120-126

**MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF WIRE ARC ADDITIVE
MANUFACTURING Al – 5Si ALLOY**

© 2024 C. Su^{1,2}, X. Chen¹, H. Hao²

¹Wenzhou University (China, 325035, Wenzhou, South Campus)

²Samara National Research University (34 Moskovskoe highway, Samara, 443086, Russian Federation)

Abstract. Al – 5Si alloy (4043), because of its good formability, high specific strength, and excellent corrosion resistance, is widely used in aerospace and automotive engineering. With the research and application of additive manufacturing technology such as wire/power laser additive manufacture, wire/power arc additive manufacture and so on. In this study, the Al – 5Si alloys have been used as raw materials for additive manufacturing research and wire arc additive manufacturing system equipped with 3D path simulation software, arc heat source and robot controlling platform is adopted to fabricate Al – 5Si alloy. The microstructure and mechanical properties of this Al – 5Si alloys are investigated. The x-ray diffraction results reveal that the as-deposited alloy is composed of α -Al, Si phase and intermetallic phase Al₃Si. According to optical microscope observation, it is found that as the deposition height increases, the eutectic Si phase is significantly coarsened and the columnar grains are gradually refining and transforming into finer equiaxed grains, and the grain size of the microstructure of the inter-layer regions is smaller than that of the inner-layer regions at any height. The average micro-hardness presents 47.5 ± 3.4 Hv, and the strength properties present only 1.6 – 5.0 MPa difference in ultimate tensile strength, 2.4 – 5.9MPa difference in yield strength and 0.1 – 1.1 % difference in elongation between tensile samples cut from different locations. It further indicates the better stability of wire arc additive manufacturing samples, and it is a better manufacturing method to fabricate metal parts.

Keywords: Al – 5Si alloy, microstructure, microhardness, tensile properties, wire arc additive manufacture

Funding. The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-79-10245, <https://rscf.ru/project/22-79-10245/>.

For citation: Su C., Chen X., Hao H. Microstructure and mechanical properties of wire arc additive manufacturing Al-5Si alloy. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):120–126. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-120-126](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-120-126)

Оригинальная статья

**МИКРОСТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОВОЛОКИ ДУГОВОГО
АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА СПЛАВА Al – 5Si**

© 2024 г. Ч. Су^{1,2}, С. Чэн¹, Х. Хао²

¹Университет Вэньчжоу (Китай, 325035, Вэньчжоу, Южный кампус, административное здание, 212 А)

²Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самара, Московское шоссе, 34)

Аннотация. Сплав Al – 5Si (4043) благодаря своей хорошей пластичности, высокой удельной прочности и отличной коррозионной стойкости широко используется в авиационном и автомобильном машиностроении. Это стало возможным, благодаря развитию и применению проволочных и дуговых технологий аддитивного производства. В настоящей работе сплавы Al – 5Si были использованы в качестве сырья для исследования аддитивного производства. Система дугового аддитивного производства, оснащенная программным обеспечением для моделирования 3D траектории, источником

тепла дуги и платформой для управления роботом, была принята для изготовления сплава Al – 5Si. Исследованы микроструктура и механические свойства сплава Al – 5Si. Результаты рентгеновской дифракции показывают, что сплав состоит из α -Al, фазы Si и интерметаллической фазы Al₉Si. По данным оптического микроскопического наблюдения установлено, что с увеличением высоты осаждения эвтектическая фаза Si значительно огрубляется, столбчатые зерна постепенно измельчаются и превращаются в более мелкие равноосные зерна, а размер зерна микроструктуры межслоевых областей меньше, чем внутрислоевых областей на любой высоте. Средняя микротвердость составляет $47,5 \pm 3,4$ HV, а прочностные свойства отличаются только на 1,6 – 5,0 МПа по пределу прочности, 2,4 – 5,9 МПа по пределу текучести и 0,1 – 1,1 % по удлинению между образцами на растяжение, вырезанными из разных мест. Это также указывает на лучшую стабильность образцов, изготовленных методом аддитивного производства с использованием проволоочной дуги, и на то, что это лучший метод изготовления металлических деталей.

Ключевые слова: сплав Al – 5Si, микроструктура, микротвердость, свойства при растяжении, проволоочное дуговое аддитивное производство

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10245, <https://rscf.ru/project/22-79-10245/>.

Для цитирования: Су Ч., Чэн С., Хао Х. Микроструктура и механические свойства проволоки дугового аддитивного производства сплава Al – 5Si. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):120–126. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-120-126](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-120-126)

Introduction

Wire arc additive manufacturing (WAAM) is a direct energy deposition (DED) AM technology that uses arc welding as a heat source to melt the metal wire to deposit fabricated components layer-by-layer, which follows a model slice and a planned path. WAAM requires the following steps: building a CAD model, using 3D slicing software for model path planning and process parameter design, using a robotic or gantry system welding device for multi-layer deposition, and optional component post-processing operations [1 – 3]. Compared with powder-based additive manufacturing processes [4], WAAM has the advantages of high deposition rates, near-net-shape parts, reduced lead times and metal waste, low material costs and low setup costs [5 – 8]. Therefore, the WAAM process is more suitable for building many components than other AM routes [9 – 11]. In addition, the WAAM sample produced by the CMT process produced fewer pores, thus, the mechanical strength of the WAAM sample is improved.

In this study, Al – 5Si alloy was deposited using wire arc additive manufacturing based cold metal transfer (WAAM-CMT). The phase composition, microstructure, micro-hardness, and mechanical properties of the samples along the deposition height of Al–5Si samples had been investigated.

Materials and Methods

In the experiment, the bulk Al-5Si aluminum alloys with a dimension of $150 \times 30 \times 70$ mm were deposited by WAAM-CMT system equipped with

3D path simulation software, Fronius CMT-Advance power source, 6-axis FANUC robot, wire feeder, Ar gas and a robot controller (Fig. 1, a), and the optimized parameter settings are as follows: ER4043 (Al – 5Si) alloy filler wire with a diameter of 1.2 mm was selected as the deposition material. The wire feed speed, deposition speed and Ar flow rate were set as 5.5 m/min, 0.6 m/min and 25 L/min, respectively. Before processing, the 6061-T6 aluminum alloy plate with the size of $200 \times 60 \times 10$ mm was mechanically cleaned and fixed on the workbench as the base metal. The nominal chemical composition of BM and FW is listed in Table.1. The deposited samples and the schematic of sample positions for microstructural and mechanical tests are shown in Fig. 1, c. The cross section of the bulk alloy (sample e) for metallographic analysis was ground, polished, and etched with Keller's solution for about 15 seconds. The x-ray diffraction (XRD) and optical microscope (OM) were used for phase identification and microstructure analysis. Vickers micro-hardness tests were performed along the mid-height and the mid-width direction of samples, with 200 g force and an indentation dwells time of 10 s. Tensile tests of standard round tensile bars were carried out in a universal tensile testing machine at the loading rate of 2.0 mm/min. The secondary dendrite arm spacing, or the length of cellular grains and cooling rate were subsequently calculated by the Equation 1 [12].

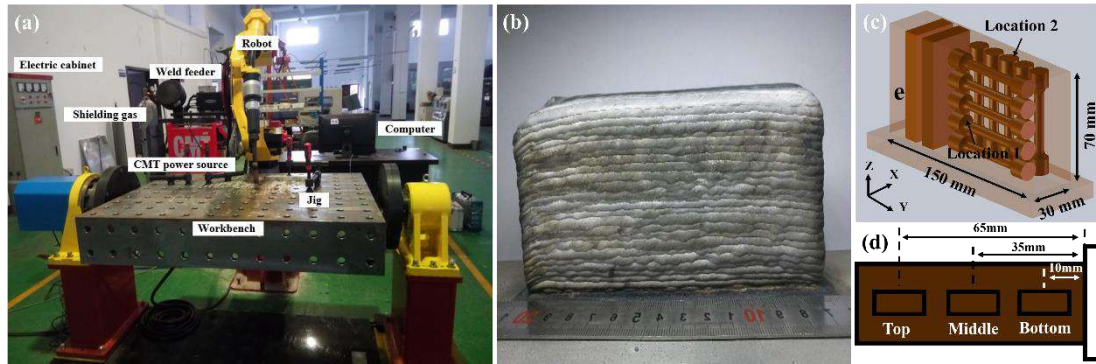


Fig.1 WAAM-CMT Al – 5Si alloys: (a) WAAM-CMT system; (b) Al – 5Si alloys sample; (c) schematic diagram of samples used for the tests; (d) the locations for micro-hardness samples; (e) the locations of sample used for micromorphology observation

Рис.1 WAAM-CMT сплавы Al – 5Si: (a) система WAAM-CMT; (b) образец сплава Al – 5Si; (c) схема образцов, используемых для испытаний; (d) расположение образцов микротвердости; (e) расположение образцов, используемых для микроморфологического наблюдения

Table 1. Chemical composition of the ER4043 and 6061 alloy

Таблица 1. Химический состав сплава ER4043 и 6061

Composition	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Al
ER4043	4.5~6.0	0.8	0.3	0.05	0.05	Balance
6061	0.4~0.8	0.7	0.15~0.4	0.15	0.8~1.2	Balance

$$L_{ave} = \frac{L_s N_s + L_c N_c}{2 N_c N_s}, \quad (1)$$

where L_s is the length in μm and N_s is the number of dendrite arm spaces, L_c is the length of cellular grains and N_c is the number of cellular grains.

2. Results and Discussion

2.1 Microstructure

According to the XRD data in Fig. 2, a, the predominant phases in the WAAM-CMT Al-5Si samples with different deposition heights are α -Al, Si phase and intermetallic phase Al_9Si [13] and do not change. But a clear difference between the three regions can be seen in the α -Al phase. There is a strong main (111) crystal orientation peak in all samples, and both (200) crystal orientation peaks and (311) crystal orientation peaks have relatively high peaks, indicating that these are the main crystal orientations of the samples. At the same time, the crystal orientation peaks at the middle region are higher than those at the top and bottom regions, and the crystal orientation peaks at the top region are higher than those at the bottom region. This shows that the deposition height has an important influence on the crystal orientation.

Fig. 2, b shows the microstructure of Al – 5Si alloys along the deposition height. It can be found that after increasing the deposition height, although the microstructure heterogeneity did not change, the equiaxed to columnar ratio of the as-deposited sam-

ples is greatly improved. As the deposition height increases, the columnar grains are gradually refined and transformed into finer equiaxed grains, and the grain size of the microstructure of the TLRs is smaller than that of the NLRs at any height. In addition, with the increase in deposition height, the dendritic morphology of the α -Al phase is gradually refined and transformed into honeycomb-like grains both within and between layers. The eutectic Si phase is significantly coarsened, and the Si is spherical or square along the grain-boundary and the bounds show a discontinuous distribution. According to the measurement of dendritic arm spacing or honeycomb grains, it presents that the bottom regions in this study have approximately L_{ave} of 8.25 μm in the TLRs and 8.84 μm in the NLRs across 7 print layers. In contrast, there is the decreasing grain size (L_{ave} : 7.95 μm in the TLRs and 8.38 μm in the NLRs) in the top regions of sample (Table 2).

2.2 Micro-hardness

Fig. 3 depicts the micro-hardness distribution of the cross-section of the Al – 5Si alloy samples. As shown in Fig. 3, a, the micro-hardness measurement along the horizontal width of the Al-5Si alloy sample is selected, that is, the top region and the middle region and bottom region. There is a periodic change in the micro-hardness value with the deposition height. Among them, the average micro-hardness value of the top region of the sample is 50.7HV, the average micro-hardness value of the

middle region of the sample is 48.5HV, and the av-

erage micro-hardness value of the bottom region of

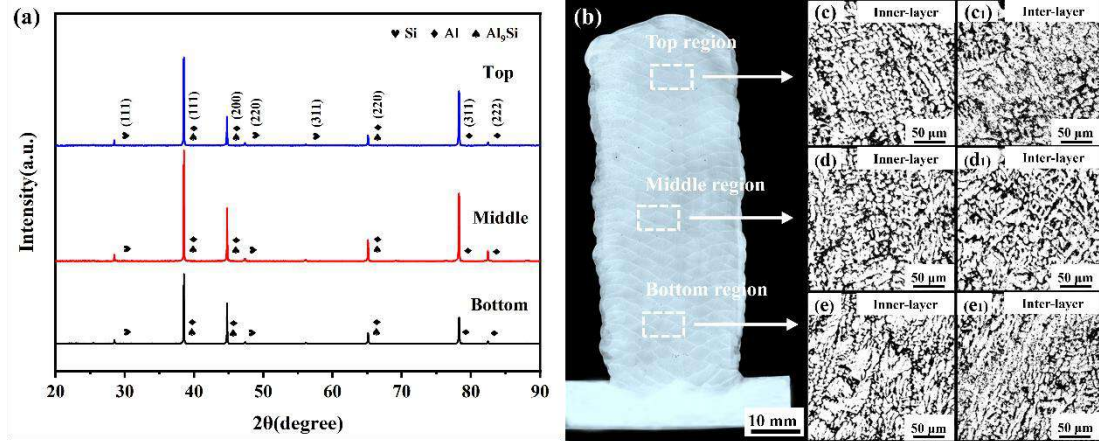


Fig. 2 (a) the XRD results of WAAM-CMT Al – 5Si alloys; (b) the microstructures of WAAM-CMT Al – 5Si alloys under different regions

Рис. 2 результаты рентгеноструктурного анализа сплавов WAAM-CMT Al – 5Si; (b) микроструктуры сплавов WAAM-CMT Al – 5Si в различных областях

Table 2. The grain size of Al-5Si alloys in NLR/TLR

Таблица 2. Размер зерна сплавов Al-5Si в NLR/TLR

Sample	L_{ave} – NLRs, μm	L_{ave} – TLRs, μm
Bottom region	8.84	8.25
Middle region	8.53	8.11
Top region	8.38	7.95

the sample is 43.3HV. With the increase of the deposition height, the micro-hardness value of the sample shows an increasing trend, and the micro-hardness value on the uniform horizontal line does not change much, and the micro-hardness changing value is 3.4 HV, which further indicates the stability of the deposition sample. At the same time, as shown in Fig. 3, b, the micro-hardness measurement along the mid-height of the Al – 5Si alloy. Pores, cracks and equiaxed grains are more prone to product around TLRs, resulting in lower micro-hardness at defect sites and higher micro-hardness in the equiaxed grain region. In the mid-high direc-

tion near the base metal and the top region of the sample, the micro-hardness values are higher in both the TLRs and NLRs due to the formation of finer grain sizes [14].

2.3 Tensile properties

Tensile test results (tensile strength-UTS, yield strength-YS and elongation-E) of two different regions of alloy samples are shown in Fig. 4. Tensile test results on the top region of the samples are different from those on the bottom region of the sample. The tensile strength of the samples increases by 6.6 MPa from 205.6 to 212.2 MPa as the increase of

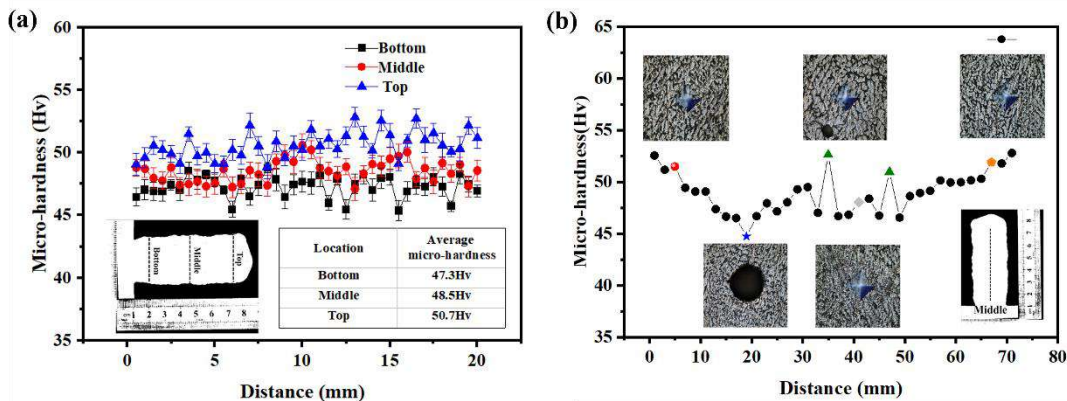


Fig. 3 The micro-hardness of WAAM-CMT Al – 5Si alloys along horizontal width (a) and mid-height (b) directions

Рис. 3 Микротвердость сплавов WAAM-CMT Al – 5Si в горизонтальном направлении по ширине (a)

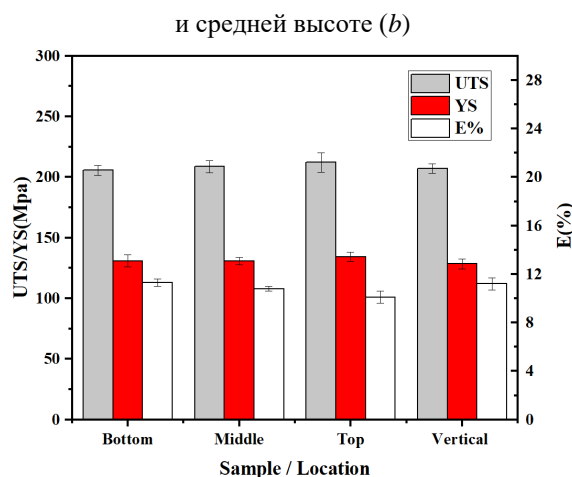


Fig. 4 The tensile properties of WAAM-CMT Al – 5Si alloys

Рис. 4 Растяжимость сплавов WAAM-CMT Al – 5Si

deposition height. The yield strength also increases from 130.9 to 134.4 MPa with the elongation is relatively reduced by 1.3 %. Analysis of tensile test results show that the increase in deposition height improve the tensile properties of the Al – 5Si alloys. Besides, the tensile strength and yield strength in the location 1 are also higher than those in the location 2.

The fracture morphology of the Al – 5Si sample is shown in Fig. 5. The fracture analysis reveals the characteristics of ductile fracture. Fig. 5, *c*, *d* show that the second phase particles are uniformly distributed at the center of the dimples of the fracture. The cracking of the alloy matrix is caused by the

second phase particles and interlayer defects – pores and cracks. During the tensile test, the stress is concentrated in the second phase particles and interlayer defects. As the stress increases, microcracks and microcrack propagation may appear in the structure. These microcracks connect with each other, grow up and cause the material to fracture [15].

3. Conclusions

In the current work, the phase formation, microstructure, and mechanical properties of WAAM-CMT Al – 5Si alloy samples along the deposition height have been investigated. The main phases include α -Al, Si phase and intermetallic phase Al_9Si ,

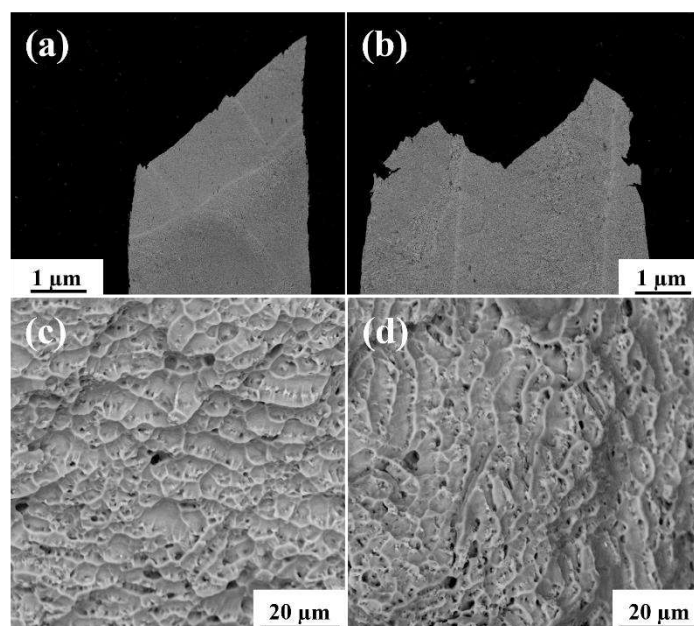


Fig. 5. Fracture surface images of WAAM-CMT Al – 5Si alloys at location 1 and location 2

Рис. 5. Изображения поверхности излома сплавов WAAM-CMT Al – 5Si в точках 1 и 2

the α -Al phase is gradually refined and transformed into honeycomb-like grains both within and between layers. The higher micro-hardness and strength of Al – 5Si alloys among all samples are attributed to the equiaxed grains with coarsened Si phases and less defects. The analysis of tensile test results among different deposition heights shows that the increase in deposition height improve the ultimate tensile strength of the Al – 5Si alloys. But the little difference in performance indicates the stability of the Al – 5Si alloys are better.

REFERENCES

- Liu J., Xu Y., Ge Y., Hou Z., Chen S. Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020;111:149–198. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05966-8>
- Norrish J., Polden J., Richardson I. A review of wire arc additive manufacturing: development, principles, process physics, implementation and current status. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2021;54(47):473001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac1e4a>
- Lin Z., Song K., Yu X. A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;70:24–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.08.018>
- Campagnoli M. R., Galati M., Saboori A. On the processability of copper components via powder-based additive manufacturing processes: Potentials, challenges and feasible solutions. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;72:320–337. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.10.038>
- Kawalkar R., Dubey H. K., Lokhande S. P. Wire arc additive manufacturing: A brief review on advancements in addressing industrial challenges incurred with processing metallic alloys. *Materials Today: Proceedings*. 2022;50:1971–1978. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.329>
- Blakey-Milner B., Gradl P., Snedden G., Brooks M., Pitot J., Lopez E., Du Plessis A. Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design*. 2021;209:110008. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>
- Xia C., Pan Z., Polden J., Li H., Xu Y., Chen S., Zhang Y. A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system. *Journal of manufacturing systems*. 2020;57:31–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.08.008>
- Kruth J. P. Material increment manufacturing by rapid prototyping techniques. *CIRP annals*. 1991; 40(2):603–614. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61136-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61136-6)
- Vafadar A., Guzzomi F., Rassau A., Hayward K. Advances in metal additive manufacturing: a review of common processes, industrial applications, and current challenges. *Applied Sciences*. 2021;11(3):1213. <https://doi.org/10.3390/app11031213>
- Yeong W. Y., Chua C. K., Leong K. F., Chandrasekaran, M. Rapid prototyping in tissue engineering: challenges and potential. *TRENDS in Biotechnology*. 2004;22(12):643–652. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2004.10.004>
- Haghdadi N., Laleh M., Moyle M., Primig S. Additive manufacturing of steels: a review of achievements and challenges. *Journal of Materials Science*. 2021;56:64–107. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05109-0>
- Su C., Chen X., Konovalov S., Arvind Singh R., Jayalakshmi S., Huang L. Effect of deposition strategies on the microstructure and tensile properties of wire arc additive manufactured Al-5Si alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021;30(3):2136–2146. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05528-3>
- Qi Z., Qi B., Cong B., Zhang R. Microstructure and mechanical properties of wire+ arc additively manufactured Al-Mg-Si aluminum alloy. *Materials Letters*. 2018;233:348–350. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.09.048>
- Koli Y., Yuvaraj N., Sivanandam A., Vipin. Control of humping phenomenon and analyzing mechanical properties of Al-Si wire-arc additive manufacturing fabricated samples using cold metal transfer process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2022;236(2):984–996. <https://doi.org/10.1177/0954406221998402>
- Guo Y., Han Q., Hu J., Yang X., Mao P., Wang J., Liu C. Comparative Study on Wire-Arc Additive Manufacturing and Conventional Casting of Al-Si Alloys: Porosity, Microstructure and Mechanical Property. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2022:1–11. <https://doi.org/10.1007/s40195-021-01314-1>

REFERENCES

- Liu J., Xu Y., Ge Y., Hou Z., Chen S. Wire and arc additive manufacturing of metal components: a review of recent research developments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020;111:149–198. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05966-8>
- Norrish J., Polden J., Richardson I. A review of wire arc additive manufacturing: development, principles, process physics, implementation and current status. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2021;54(47):473001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac1e4a>
- Lin Z., Song K., Yu X. A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;70:24–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.08.018>

4. Campagnoli M. R., Galati M., Saboori A. On the processability of copper components via powder-based additive manufacturing processes: Potentials, challenges and feasible solutions. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021;72:320–337. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.10.038>
5. Kawalkar R., Dubey H. K., Lokhande S. P. Wire arc additive manufacturing: A brief review on advancements in addressing industrial challenges incurred with processing metallic alloys. *Materials Today: Proceedings*. 2022;50:1971–1978. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.329>
6. Blakey-Milner B., Gradl P., Snedden G., Brooks M., Pitot J., Lopez E., Du Plessis A. Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design*. 2021;209:110008. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>
7. Xia C., Pan Z., Polden J., Li H., Xu Y., Chen S., Zhang Y. A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system. *Journal of manufacturing systems*. 2020;57:31–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.08.008>
8. Kruth J. P. Material increment manufacturing by rapid prototyping techniques. *CIRP annals*. 1991; 40(2):603–614. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61136-6](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61136-6)
9. Vafadar A., Guzzomi F., Rassau A., Hayward K. Advances in metal additive manufacturing: a review of common processes, industrial applications, and current challenges. *Applied Sciences*. 2021;11(3):1213. <https://doi.org/10.3390/app11031213>
10. Yeong W. Y., Chua C. K., Leong K. F., Chandrasekaran, M. Rapid prototyping in tissue engineering: challenges and potential. *TRENDS in Biotechnology*. 2004;22(12):643–652. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2004.10.004>
11. Haghdadi N., Laleh M., Moyle M., Primig S. Additive manufacturing of steels: a review of achievements and challenges. *Journal of Materials Science*. 2021;56:64–107. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05109-0>
12. Su C., Chen X., Konovalov S., Arvind Singh R., Jayalakshmi S., Huang L. Effect of deposition strategies on the microstructure and tensile properties of wire arc additive manufactured Al-5Si alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2021;30(3):2136–2146. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05528-3>
13. Qi Z., Qi B., Cong B., Zhang R. Microstructure and mechanical properties of wire+ arc additively manufactured Al-Mg-Si aluminum alloy. *Materials Letters*. 2018;233:348–350. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.09.048>
14. Koli Y., Yuvaraj N., Sivanandam A., Vipin. Control of humping phenomenon and analyzing mechanical properties of Al-Si wire-arc additive manufacturing fabricated samples using cold metal transfer process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2022;236(2):984–996. <https://doi.org/10.1177/0954406221998402>
15. Guo Y., Han Q., Hu J., Yang X., Mao P., Wang J., Liu C. Comparative Study on Wire-Arc Additive Manufacturing and Conventional Casting of Al-Si Alloys: Porosity, Microstructure and Mechanical Property. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2022:1–11. <https://doi.org/10.1007/s40195-021-01314-1>

Information about the authors

Chuanchu Su, Postgraduate student, Samara National Research University, Wenzhou University

E-mail: chuancsu@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7472-0025

Xizhang Chen, PhD, Professor, College of Mechanics and Electrical Engineering, Wenzhou University

E-mail: chenxizhang@wzu.edu.cn

ORCID: 0000-0003-1649-1820

Hu Hao, Postgraduate student, Samara National Research University

E-mail: 641229879@qq.com

ORCID: 0009-0004-2902-2593

Сведения об авторах

Чуанчу Су, аспирант, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П.

Королева, Университет Вэньчжоу

E-mail: chuancsu@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7472-0025

Сичжан Чен, PhD., профессор, колледж механики и электротехники, Университет Вэньчжоу

E-mail: chenxizhang@wzu.edu.cn

ORCID: 0000-0003-1649-1820

Ху Хао, аспирант, Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева

E-mail: 641229879@qq.com

ORCID: 0009-0004-2902-2593

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 20.12.2023

После доработки 27.12.2023

Принята к публикации 29.12.2023

Received 20.12.2023

Revised 27.12.2023

Accepted 29.12.2023

Оригинальная статья

УДК 669.184

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-127-134

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЫПЛАВКИ И
ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ КОНВЕРТЕРНЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА
МЕЛЮЩИХ ШАРОВ**

© 2024 г. И. С. Морозов, А. А. Уманский, Е. В. Протопопов, А. С. Симачев

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

Аннотация. Проведены исследования процессов и механизмов формирования металлургического качества мелющих шаров и их эксплуатационных характеристик в зависимости от параметров производства специализированных сталей в условиях кислородно-конвертерного производства АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат». Основными причинами неудовлетворительной ударной стойкости мелющих шаров из стали марок Ш2.1 и Ш2.3 является наличие дефектов сталеплавленного происхождения (флокены, скопления неметаллических включений, внутренние несплошности (поры) и развитая химическая неоднородность). Определено, что большое влияние на повышение ударостойкости мелющих шаров оказывает снижение содержания кислорода в металле на выпуске в ковш, уменьшение содержания серы и водорода в стали после ковшевой обработки, а также повышение длительности продувки стали инертным газом в процессе внепечной обработки на агрегате ковш-печь. Суммарная относительная степень влияния рассмотренных на отбраковку мелющих шаров при испытаниях на ударную стойкость составляет 73 %. На основании полученных закономерностей для условий рассматриваемого предприятия разработаны рекомендации по совершенствованию технологических режимов выплавки и внепечной обработки сталей для производства мелющих шаров, использование которых на практике подтвердило их эффективность. Зафиксировано снижение отбраковки мелющих шаров из стали марок Ш2.1 и Ш2.3 при копровых испытаниях в среднем на 3 % за счет снижения дефектообразования в исходных непрерывнолитых заготовках.

Ключевые слова: конвертерная сталь, внепечная обработка, внутренние дефекты, мелющие шары, ударная стойкость, неметаллические включения

Для цитирования: Морозов И.С., Уманский А.А., Протопопов Е.В., Симачев А.С. Совершенствование технологии выплавки и внепечной обработки специализированных конвертерных сталей для производства мелющих шаров. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):127–134. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-127-134](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-127-134)

Original article

**IMPROVING THE TECHNOLOGY OF SMELTING AND OUT-OF-FURNACE
PROCESSING OF SPECIALIZED CONVERTER STEELS FOR THE PRODUCTION
OF GRINDING BALLS**

© 2024 I. S. Morozov, A. A. Umanskii, E. V. Protopopov, A. S. Simachev

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

Abstract. The processes and mechanisms of forming the metallurgical quality of grinding balls and their operational characteristics have been studied depending on the parameters of the production of specialized steels in the conditions of oxygen converter production of JSC EVRAZ United West Siberian Metallurgical Combine. The

main reasons for the unsatisfactory impact resistance of grinding balls made of steel grades Sh2.1 and Sh2.3 are the presence of defects of steelmaking origin (flocules, accumulations of non-metallic inclusions, internal discontinuities (pores) and developed chemical heterogeneity). It was determined that a great influence on increasing the impact resistance of grinding balls is exerted by a decrease in the oxygen content in the metal at the outlet into the bucket, a decrease in the sulfur and hydrogen content in the steel after bucket treatment, as well as an increase in the duration of steel purging with inert gas during out-of-furnace treatment on the bucket-furnace unit. The total relative degree of influence of the grinding balls considered for rejection during impact resistance tests is 73 %. Based on the obtained patterns for the conditions of the enterprise under consideration, recommendations have been developed to improve the technological modes of smelting and out-of-furnace processing of steels for the production of grinding balls, the use of which in practice has confirmed their effectiveness. A decrease in the rejection of grinding balls from steel grades Sh2.1 and Sh2.3 during drilling tests was recorded by an average of 3 % due to a decrease in defect formation in the initial continuously cast billets.

Keywords: converter steel, non-furnace treatment, internal defects, grinding balls, impact resistance, non-metallic inclusions

For citation: Morozov I.S., Umanskii A.A., Protopopov E.V., Simachev A.S. Improving the technology of smelting and out-of-furnace processing of specialized converter steels for the production of grinding balls. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):127–134. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-127-134](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-127-134)

Введение

Стальные мелющие (помольные) шары являются в настоящее время одним из наиболее востребованных видов металлопроката. Это объясняется широкой областью применения помольных шаров, которая включает в себя измельчение исходного сырья и материалов на предприятиях металлургической, горнорудной, цементной промышленности [1 – 3]. Необходимо констатировать, что наиболее значительная доля мелющих шаров производится из специальных шаровых сталей, химический состав которых регламентирован внутренней документацией предприятий (техническими условиями, стандартом организации, техническим стандартом). Для производства шаров широкое применение также находит отбраковка заготовок рельсовых сталей и рельсов [4 – 7].

Основными параметрами качества мелющих шаров, исходя из условий их эксплуатации, выступают твердость и устойчивость к ударным нагрузкам [8 – 12]. Требуемая высокая твердость шаров успешно достигается за счет применения для их производства средне- и высокоуглеродистых сталей [13; 14]. В ряде случаев эти стали дополнительно легируют хромом, марганцем, никелем, молибденом [15 – 17]. Также в обязательном порядке предусмотрена закалка мелющих шаров [18 – 22]. При этом производство шаров, обладающих высокой ударостойкостью, представляет объективную проблему, что обусловлено влиянием металлургического качества шаров (наличием флокенов, расслоений, дефектов усадочного происхождения) на рассматриваемую характеристику [23 – 25]. Поскольку формирование металлургического качества шаров обусловлено технологическими режимами производства стали, то совершенствование тех-

нологии выплавки и внепечной обработки шаровых сталей является актуальной задачей.

Методика проведения исследований

Исследования, направленные на совершенствование выплавки и внепечной обработки шаровых сталей, проводили применительно к условиям кислородно-конвертерного цеха № 2 (ККЦ-2) АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат» (АО «ЕВРАЗ ЗСМК») и включали в себя два основных этапа.

На первом этапе с использованием металлографического анализа исследовали характерные дефекты мелющих шаров, являющиеся причиной их раскола при испытаниях на ударную стойкость (при копровых испытаниях). В качестве объекта исследований использовали шары diam. 40, 50 и 60 мм 20-ти плавок конвертерной стали специализированных марок Ш2.1 и Ш2.3 производства ККЦ-2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Также дополнительно проводили исследования макро- и микроструктуры заготовок. Для проведения металлографических исследований применяли оптический микроскоп OLYMPUS GX-51, оснащенный цифровой металлографической камерой. В дополнении к металлографическим исследованиям анализировали степень развития ликвационных процессов по сечению заготовок путем рентгеноспектрального анализа проб (рентгенофлуоресцентный спектрометр Shimadzu XRF-1800). Относительную степень ликвации определяли по следующей формуле:

$$L_3 = \frac{(C_3^X - C_3^{ПЛ})}{C_3^{ПЛ}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где C_9^x и $C_9^{пл}$ – содержание элемента в точке замера и по данным ковшевой пробы, %.

На втором этапе провели статистические исследования влияния параметров выплавки и внепечной обработки сталей рассматриваемых марок на отбраковку шаров по результатам их копровых испытаний. Использовали стандартные методики множественного регрессионного и дисперсионного анализов. Применяли метод пассивного эксперимента, в качестве объекта исследования использовали случайную выборку из 100 плавок стали марок Ш2.1 и Ш2.3 текущего производства ККЦ-2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК».

В качестве параметра оптимизации при проведении статистических исследований использовали отбраковку шаров по результатам копровых испытаний. При проведении дисперсионного анализа исследовали влияние бригады и смены производства стали. Для регрессионного анализа выбрали следующие параметры:

- состав металлошхты конвертерной плавки;
- температура и химический состав металла на выпуске из конвертера;
- окисленность стали на выпуске из конвертера;
- химический состав конвертерного и ковшевого шлака;
- температура и химический состав металла при обработке на установке доводки металла (УДМ);
- температура и химический состав металла при обработке на агрегате ковш-печь (АКП);
- продолжительность продувки инертным газом на УДМ и АКП;
- температура окончания обработки стали на УДМ и АКП.
- содержание водорода в стали после внепечной обработки.

Результаты исследований и их обсуждение

На основании проведенных металлографических исследований в изломе шаров из стали марок Ш2.1 и Ш2.3, невыдержавших испытания на ударную стойкость, обнаружены следующие виды дефектов: флокены (рис. 1, *a*), ликвационные полосы (рис. 1, *b*), скопления неметаллических включений (рис. 1, *в – д*) и внутренние несплошности на фоне скоплений неметаллических включений (рис. 1, *e*). Указанные дефекты встречаются преимущественно в центральной зоне шаров.

При проведении исследований было определено, что примерно в 10 % изломах шаров выявленные дефекты макро- и микроструктуры отсутствуют, то есть излом имеет усталостный характер (рис. 2).

При изучении макроструктуры исходных заготовок установлено, что примерно 10 % из них поражены флокенами (рис. 3, *a*). Подтверждением этого (помимо внешнего вида) является отсутствие неметаллических включений в зоне их расположения (рис. 3, *b*).

Установлено наличие значительной ликвации углерода, серы и фосфора по сечению заготовок. Минимальное содержание указанных химических элементов имеет место в приповерхностной зоне заготовок, а максимальное – в осевой. По данным проведенных исследований степень ликвации по углероду составляет от –3 до 16 %, по сере – от –33 до 71 %, по фосфору – от –12 до 78 %. При исследовании неметаллических включений установлено, что наибольшая концентрация включений в виде оксидов, недеформирующихся силикатов и сульфидов обнаруживается в центральной зоне заготовок. Если в приповерхностной зоне заготовок имеют место неметаллические включения в виде оксидов и силикатов минимальных баллов по ГОСТ 1778 – 2022 (баллы 1а, 1б), то в центральной зоне заготовок концентрация указанных включений значительно выше и соответствуют баллам до 4а, 4б (ГОСТ 1778 – 2022).

На основании дисперсионного анализа установлено, что с вероятностью 95 % бригада и смена выплавки стали не оказывают значимого влияния на отбраковку шаров по результатам копровых испытаний. По результатам регрессионного анализа получили, что повышение окисленности стали на выпуске из конвертера, увеличение содержания серы в готовой стали, снижение длительности продувки при внепечной обработке металла на АКП и увеличение содержания водорода после внепечной обработки оказывают значимое влияние на увеличение отбраковки мелющих шаров по результатам их испытаний на ударную стойкость:

$$B_K = 4,9 + 0,015[O] + 84,6[S] - 0,024t_{\text{прод}} + 430[H], \quad (2)$$

где B_K – отбраковка шаров по результатам копровых испытаний на ударную стойкость, %; $[O]$ – окисленность стали на выпуске из конвертера, ppm; $[S]$ – содержание серы в готовой стали, %; $t_{\text{прод}}$ – продолжительность продувки аргоном при обработке стали на агрегате ковш-печь, мин; $[H]$ – содержание водорода в стали, ppm.

Суммарная степень влияния перечисленных параметров выплавки и внепечной обработки стали на ударную стойкость производимых шаров составила 73 %. Необъясненная вариация в размере 27 % обусловлена отсутствием данных о ряде технологических параметров в пригодной

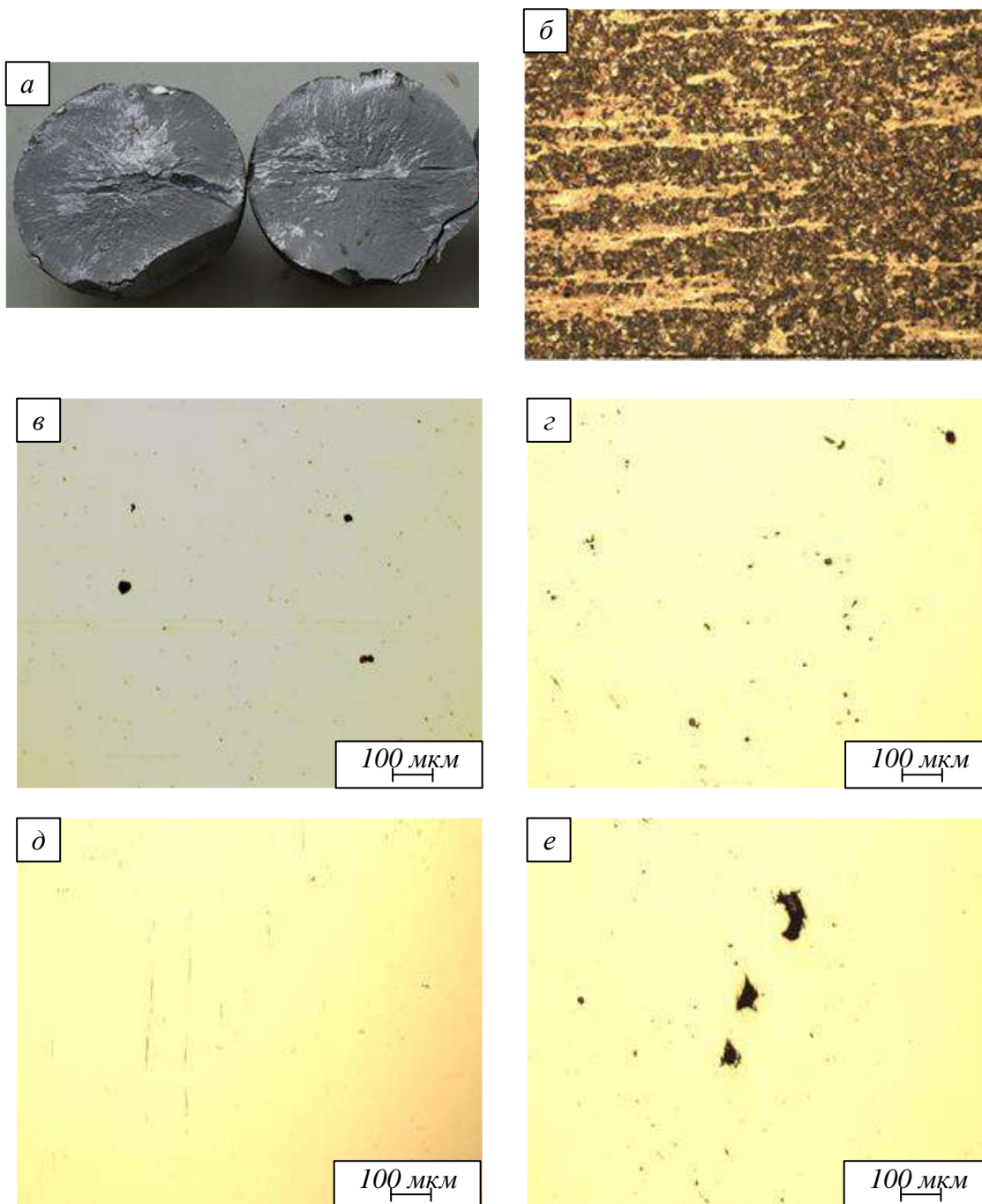


Рис. 1. Характерные дефекты в изломе шаров:
a – флокены; *б* – ликвационные полосы; *в* – силикаты недеформирующиеся балл 4б; *г* – оксиды точечные балл 4а;
д – сульфиды балл 3б; *е* – силикаты недеформирующиеся балл 2а + поры
 Fig. 1. Characteristic defects in the fracture of the balls:
a – floccules; *б* – liquation bands; *в* – non-deformable silicates score 4b; *г* – point oxides score 4a; *д* – sulfides score 3b;
е – non-deformable silicates score 2a + pores

для анализа форме, а также влиянием параметров непрерывной разливки стали, не анализированными в ходе настоящего исследования.

Влияние повышения окисленности металла при выпуске из конвертера в ковш на снижение ударостойкости шаров обусловлено обратной зависимостью между содержанием кислорода в нераскиленной стали с количеством неметаллических включений, образующихся при вводе ферросплавов и легирующих добавок. Повы-

шенная окисленность стали на выпуске приводит к увеличению концентрации оксидных и силикатных включений в стали, скопления которых обнаружены в изломе шаров, невыдержавших копровые испытания (рис. 1, *в*, *г*).

Полученные данные о снижении ударной стойкости мелющих шаров при повышенном содержании серы в стали объясняются увеличением концентрации сульфидных неметалличес-



Рис. 2. Излом усталостного характера в шарах, не выдержавших испытания на ударную стойкость
 Fig. 2. Fatigue fracture in balls, balls that have not passed the impact resistance test

ких включений, скопления которых также обнаружены в изломах мелющих шаров (рис. 1, *д*).

Увеличение длительности продувки металла в ковше инертным газом способствует уменьшению развития химической неоднородности и интенсификации процессов рафинирования расплава от неметаллических включений, чем и объясняется снижение отбраковки мелющих шаров с учетом типов характерных дефектов в изломе шаров (рис. 1).

Повышение содержания водорода в стали закономерно увеличивает вероятность образования флокенов, являющихся концентраторами напряжений при ударных нагрузках и приводящих к расколу шаров при их копровых испытаниях (рис. 1, *а*).

На основании полученных закономерностей формирования металлургического качества и ударной стойкости мелющих шаров разработаны усовершенствованные технологические режимы выплавки и внепечной обработки в ККЦ-2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» стали марок Ш2.1 и Ш2.3, использование которых позволило снизить от-

браковку мелющих шаров при копровых испытаниях на 3 % за счет снижения количества дефектов макро- и микроструктуры сталеплавильного происхождения.

Выводы

На основании исследований, проведенных в условиях кислородно-конвертерного цеха № 2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК», определены механизмы влияния параметров выплавки и внепечной обработки специальных сталей массового сортамента на качество и эксплуатационные характеристики производимых мелющих шаров. Определено, что снижение окисленности стали на выпуске из конвертера и содержания серы в готовой стали, повышение длительности продувки расплава инертным газом в процессе его ковшевой обработки и уменьшение содержания водорода в стали после внепечной обработки позволяют значительно повысить ударную стойкость мелющих шаров из сталей марок Ш2.1 и Ш2.3 за счет снижения количества дефектов металлургического происхождения. Полученные законо-

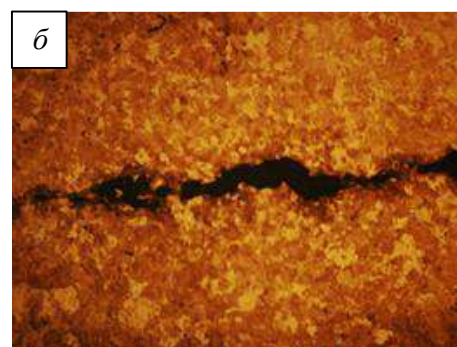


Рис. 3. Флокены в продольных образцах заготовок:
а – шлифованные образцы; *б* – образцы после травления
 Fig. 3. Floccules in longitudinal samples of workpieces:
a – ground samples; *b* – samples after etching

мерности использованы при разработке новых режимов производства шаровых сталей, применение которых в рассматриваемом цехе позволило снизить отбраковку шаров на 3 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крутилин А.Н., Бестужев Н.И., Бестужев А.Н., Каленкович Д.Н. Мелющие тела. Проблемы. Перспективы. *Литье и металлургия*. 2009;4 (53):26–33. EDN: UYGFVX; <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2009-4-26-33>
2. Umansky A.A., Prudnikov A.N., Golovatenko A.V. Analysis of the main trends in the development of the production of grinding balls in Russia and abroad. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;866:012032. EDN: SVCJAB; <https://doi.org/10.1088/1757-899X/866/1/012032>
3. Сычков А.Б. Стеблов А.Б., Березов С.Н. О выборе материала и режимов термической обработки стальных мелющих шаров, отвечающих требованиям современного мирового рынка. *Литье и металлургия*. 2013;3(71):30–32. EDN: SWKLVLR.
4. Баранов Н.А., Тулупов О.Н. Производство мелющих шаров из рельсовой стали. *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2017;1:96–99. EDN: ZEYVJL.
5. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Cyganek Z., Andrietti S., Barbelet M. An innovative method for producing balls from scrap rail heads. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;97(1-4):893–901. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2007-9>
6. Tomczak J., Pater Z., Bulzak T. The flat wedge rolling mill for forming balls from heads of scrap railway rails. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2018;63(1):5–12. <http://dx.doi.org/10.24425/118901>
7. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. A cross wedge rolling process for forming 70 mm diameter balls from heads of scrap railway rails. In: *27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Faim2017*. 2017;11:466–473. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.137>
8. Song Zh., Pu Y., Liu Zh., Wang B. Analysis of Failure of Grinding Balls During Service. *Metal Science and Heat Treatment*. 2022;64(12):127–133. EDN: MRJHRG; <https://doi.org/10.1007/s11041-022-00772-3>
9. Артес А.Э., Третьюхин В.В. Проблема совершенствования производства мелющих шаров. Качество и инновации. *Компетентность*. 2014;3(114):50–53. EDN: SBZHQH.
10. Aldrich C. Consumption of steel grinding media in mills. *Minerals Engineering*. 2013;49:77–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2013.04.023>
11. Umucu Y., Deniz V. The effect of ball type in fine particles grinding on kinetic breakage parameters. *Inzynieria Mineralna*. 2015;16(1):197–203.
12. Чжаоян С., Исун П., Чжисинь Л, Баоци В. Анализ причин растрескивания мелющих шаров при эксплуатации. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2022;2(800):59–65. <https://doi.org/10.30906/mitom.2022.2.59-65>
13. Смирнов Е.Н., Смирнов А.Н., Михеев В.В., Складар В.А., Белевитин В.А., Верзилов А.П., Орлов Г.А. Оценка применимости непрерывнолитой стали марки 55 при производстве мелющих шаров диаметром 40 мм групп твердости IV и V. *Сталь*. 2020;4:44–49. EDN: VXGXNJ.
14. Лам М.М., Серов А.И., Смирнов Е.Н., Тернавский А.А., Базарова Г.С. Промышленные испытания мелющих шаров IV группы твердости производства ПАО «Донецкий металлопрокатный завод». *Металлург*. 2016;9:63–67. EDN: WYDMPN.
15. Быков П.О., Касимгазинов А.Д. Исследование и апробация технологии получения катаных помольных шаров 5 группы твердости в условиях ПФ ТОО «Кастинг». *Наука и техника Казахстана*. 2018;1:31–40. EDN: XZDEKD.
16. Найзабеков А.Б., Мухаметкалиев Б.С., Арбуз А.С., Лежнев С.Н. Снижение расхода стальных мелющих шаров путем улучшения технологии их производства. *Вести высших учебных заведений Черноморья*. 2016;4 (46):78–86. EDN: XIBQUB.
17. Сталинский Д.В., Рудюк А.С., Соленый В.К. Освоение производства и оценка эффективности использования высококачественных мелющих шаров. Сообщение 1. Освоение производства шаров из хромомolibденовой стали. *Сталь*. 2021;11:36–39. EDN: XBFNUB.
18. Сталинский Д.В., Рудюк А.С., Соленый В.К. Выбор материала и технологии термической обработки мелющих шаров, работающих преимущественно в условиях абразивного износа. *Сталь*. 2017;6:64–69. EDN: YUNGPB.
19. Bai X., Jin Y. Heat treatment of wear resistant steel ball for large ball mill. *Jinshu Rechuli / Heat Treatment of Metals*. 2017;42(5):193–196.

<http://dx.doi.org/10.13251/j.issn.0254-6051.2017.05.040>

20. Айсат С., Садэдин А., Брадай М.А., Юнус Р., Билек А., Бенаббас А. Влияние термической обработки на твердость и износ мелющих шаров. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2017;5(743):34–38.
 21. Кузьмин С.О. Влияние режима термоупрочнения на объемную износостойкость мелющих шаров из низколегированных марок стали. *Вестник Приазовского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2011;23:117–126. EDN: TTGPTV.
 22. Самойлович Ю.А. Возможности повышения эксплуатационного ресурса крупных мелющих шаров из высокохромистой стали при использовании термоциклической обработки. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2017;6(1410):73–80. EDN: ZCSUQD.
 23. Ефременко В.Г. Металлографический анализ причин разрушения стальных катаных тел для барабанных мельниц. *Вестник Приазовского государственного технического университета*. 2000;9:89–91.
 24. Ефременко В.Г. Влияние макроструктурного состояния шаровой заготовки на качество стального проката для помольного оборудования. *Металл и литье Украины*. 2002;9–10:40–42.
 25. Галимьянов И.К. Влияние температуры и структуры круглой заготовки на раскол мелющих шаров. *Черные металлы*. 2019;10:63–66. EDN: RLVBST.
- REFERENCES**
1. Krutilin A.N., Bestuzhev N.I., Bestuzhev A.N., Kalenkovich D.N. Grinding bodies. Problems. The prospects. *Lit'e i metallurgiya*. 2009;4 (53):26–33. (In Russ.). EDN: UYGFVX; <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2009-4-26-33>
 2. Umansky A.A., Prudnikov A.N., Golovatenko A.V. Analysis of the main trends in the development of the production of grinding balls in Russia and abroad. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;866:012032. EDN: SVCJAB; <https://doi.org/10.1088/1757-899X/866/1/012032>
 3. Sychkov A.B., Steblov A.B., Berezov S.N. On the choice of materials and modes of heat treatment of steel grinding balls that meet the requirements of the modern world market. *Lit'e i metallurgiya*. 2013;3(71):30–32. EDN: SWKLVV. (In Russ.).
 4. Baranov N.A., Tulupov O.N. Production of grinding balls made of rail steel. *Aktual'nye problemy sovremennoi nauki, tekhniki i obrazovaniya*. 2017;1:96–99. EDN: ZEYVJL. (In Russ.).
 5. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T., Cyganek Z., Andrietti S., Barbelet M. An innovative method for producing balls from scrap rail heads. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;97(1–4):893–901. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2007-9>
 6. Tomczak J., Pater Z., Bulzak T. The flat wedge rolling mill for forming balls from heads of scrap railway rails. *Archives of Metallurgy and Materials*. 2018;63(1):5–12. <http://dx.doi.org/10.24425/118901>
 7. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. A cross wedge rolling process for forming 70 mm diameter balls from heads of scrap railway rails. In: *27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, Faim2017*. 2017;11:466–473. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.137>
 8. Song Zh., Pu Y., Liu Zh., Wang B. Analysis of Failure of Grinding Balls During Service. *Metal Science and Heat Treatment*. 2022;64(12):127–133. EDN: MRJHRG; <https://doi.org/10.1007/s11041-022-00772-3>
 9. Artes A.E., Tret'yukhin V.V. The problem of improving the production of grinding balls. Quality and innovation. *Kompetentnost'*. 2014;3(114):50–53. EDN: SBZHQH. (In Russ.).
 10. Aldrich C. Consumption of steel grinding media in mills. *Minerals Engineering*. 2013;49:77–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2013.04.023>
 11. Umucu Y., Deniz V. The effect of ball type in fine particles grinding on kinetic breakage parameters. *Inzynieria Mineralna*. 2015;16(1):197–203.
 12. Chzhaoyan S., Isun P., Chzhisun' L., Baotsi V. Analysis of the causes of cracking of grinding balls during operation. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2022;2(800):59–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.30906/mitom.2022.2.59-65>
 13. Smirnov E.N., Smirnov A.N., Mikheev V.V., Sklyar V.A., Belevitin V.A., Verzilov A.P., Orlov G.A. Assessment of the applicability of continuous cast steel grade 55 in the production of grinding balls with a diameter of 40 mm of hardness groups IV and V. *Stal'*. 2020;4:44–49. EDN: VXGXNJ. (In Russ.).
 14. Lam M.M., Serov A.I., Smirnov E.N., Ternavskii A.A., Bazarova G.S. Industrial tests of grinding balls of the IV hardness group produced by PJSC Donetsk Metal Rolling Plant. *Metallurg*. 2016;9:63–67. EDN: WYDMPN. (In Russ.).
 15. Bykov P.O., Kasimgazinov A.D. Research and testing of technology for producing rolled grinding balls of hardness group 5 in the conditions of PF Casting LLP. *Nauka i tekhnika Kazakhstana*. 2018;1:31–40. EDN: XZDEKD. (In Russ.).
 16. Naizabekov A.B., Mukhametkaliev B.S., Arbuz A.S., Lezhnev S.N. Reducing the consumption of steel grinding balls by improving their production technology. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya*. 2016;4 (46):78–86. EDN: XIBQUB. (In Russ.).

17. Stalinskii D.V., Rudyuk A.S., Solenyi V.K. Mastering the production and evaluating the effectiveness of using high-quality grinding balls. Message 1. Mastering the production of balls made of chrome-molybdenum steel. *Stal'*. 2021;11:36–39. EDN: XBFNUB. (In Russ.).
18. Stalinskii D.V., Rudyuk A.S., Solenyi V.K. The choice of material and technology for heat treatment of grinding balls, working mainly in conditions of abrasive wear. *Stal'*. 2017;6:64–69. EDN: YUNGPB. (In Russ.).
19. Bai X., Jin Y. Heat treatment of wear resistant steel ball for large ball mill. *Jinshu Rechuli / Heat Treatment of Metals*. 2017;42(5):193–196. <http://dx.doi.org/10.13251/j.issn.0254-6051.2017.05.040>
20. Aisat S., Sadeddin A., Bradai M.A., Yunus R., Bilek A., Benabbas A. The effect of heat treatment on the hardness and wear of grinding balls. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2017;5(743):34–38. (In Russ.).
21. Kuz'min S.O. The effect of the thermal hardening regime on the volumetric wear resistance of grinding balls made of low-alloy steel grades. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2011;23:117–126. EDN: TTGPTV. (In Russ.).
22. Samoilovich Yu.A. The possibilities of increasing the operational life of large grinding balls made of high-chromium steel when using thermocyclic processing. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii*. 2017;6(1410):73–80. EDN: ZCSUQD. (In Russ.).
23. Efremenko V.G. Metallographic analysis of the causes of destruction of rolled steel bodies for drum mills. *Vestnik Priazovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2000;9:89–91. (In Russ.).
24. Efremenko V.G. The effect of the macrostructural state of the ball billet on the quality of rolled steel for grinding equipment. *Metall i lit'e Ukrainy*. 2002;9–10:40–42. (In Russ.).
25. Galim'yanov I.K. The effect of the temperature and structure of the round billet on the splitting of grinding balls. *Chernye metally*. 2019;10:63–66. EDN: RLVBST. (In Russ.).

Сведения об авторах

Иван Сергеевич Морозов, соискатель степени к.т.н. кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: ismorozov23@mail.ru

Александр Александрович Уманский, д.т.н., доцент кафедры металлургии черных металлов, Сибирский государственный индустриальный университет
Email: umanskii@bk.ru
ORCID: 0000-0003-4403-9006

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

Артем Сергеевич Симачев, к.т.н., доцент кафедры «Обработка металлов давлением и металловедение. ЕВРАЗ ЗСМК», Сибирский государственный индустриальный университет
Email: simachev_as@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9712-3757

Information about the authors

Ivan S. Morozov, Candidates for a Degree of Cand. Sci. (Eng.) of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
Email: ismorozov23@mail.ru

Aleksandr A. Umanskiy, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Ferrous Metallurgy, Siberian State Industrial University
Email: umanskii@bk.ru
ORCID: 0000-0003-4403-9006

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

Artem S. Simachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Metal Forming and Metal Science. “EVRAZ ZSMK”, Siberian State Industrial University
Email: simachev_as@mail.ru
ORCID: 0000-0002-9712-3757

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 17.01.2024
 После доработки 29.01.2024
 Принята к публикации 07.02.2024

Received 17.01.2024
 Revised 29.01.2024
 Accepted 07.02.2024

Оригинальная статья

УДК 621.791.05:620.179

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-135-141

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ И ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗОНАХ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТЕПЛОУСТОЙЧИВОЙ СТАЛИ

© 2024 г. Н. В. Абабков

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (Россия, 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28)

Аннотация. Методом электронной микроскопии исследовали металлические образцы поврежденных и бывших в эксплуатации фрагментов паропроводов, изготовленных из теплоустойчивой стали марки 12Х1МФ, после деформации до образования зон устойчивой локализованной макродеформации. Исследовали не эксплуатированные образцы, образцы после эксплуатации без повреждений, а также образцы после разрушения в результате длительной эксплуатации. Для каждого образца был определен фазовый состав (качественный и количественный); рассчитаны следующие структурные параметры: объемные доли структурных составляющих стали; скалярная плотность рдислокаций; избыточная плотность ρ_{\pm} дислокаций; кривизна-кручение кристаллической решетки χ ; амплитуды внутренних напряжений (сдвиговых и дальнедействующих). Все количественные микроструктурные параметры определяли как для каждого структурного компонента стали, так и для образца в целом. Структура всех исследованных образцов металла в зонах устойчивой локализованной макродеформации представлена ферритом и перлитом, при этом для образцов после разрушения в процессе длительной эксплуатации только из фрагментированного и нефраgmentированного феррита. Были рассчитаны соотношения $\rho \geq \rho_{\pm}$, $\chi = \chi_{пл}$, $\sigma_l \geq \sigma_d$, которые указывают на то, есть ли опасность появления микротрещин. Для образцов без эксплуатации и после эксплуатации без повреждений в зонах устойчивой локализованной макродеформации рассматриваемые условия выполняются, а для образцов после разрушения в результате длительной эксплуатации нет. Выявлено, что при длительной эксплуатации стали происходит изменение фазового состава и тонкой структуры металла, заключающиеся в увеличении содержания феррита и уменьшении количества перлита, а также в росте плотности дислокаций и кривизны-кручения кристаллической решетки. Длительная эксплуатация стали в условиях высоких температур и давлений приводит к постепенному изменению ее свойств и структуры, что может привести к снижению надежности и безопасности эксплуатации паропроводов.

Ключевые слова: структурно-фазовое состояние, поля внутренних напряжений, плотность дислокаций, зона локализации деформации, длительная эксплуатация, теплоустойчивая сталь

Благодарности. Автор выражает признательность Смирнову А.Н., профессору кафедры Технологии машиностроения КузГТУ, Данилову В.И., в.н.с. лаборатории физики прочности ИФПМ СО РАН, Поповой Н.А. и Никоненко Е.Л., сотрудникам кафедры ФХиТМ ТГАСУ за помощь в обсуждении результатов исследований.

Для цитирования: Абабков Н.В. Исследование структурно-фазового состояния и внутренних напряжений в зонах локализации деформации образцов из теплоустойчивой стали. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):135–141. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-135-141](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-135-141)

Original article

STUDY OF STRUCTURAL-PHASE STATE AND INTERNAL STRESSES IN ZONES OF DEFORMATION LOCALIZATION OF HEAT-RESISTANT STEEL SAMPLES

© 2024 N. V. Ababkov

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (28 Vesennyaya Str., Kemerovo, 650000, Russian Federation)

Abstract. A study of metal samples from exploited and damaged sections of steam pipelines made of 0.12C-1Cr-1Mo-IV steel after deformation to the formation of zones of stable localization of deformations by the method of electron microscopy was carried out. Specimens without exploitation, after exploitation, but not damaged, and specimens after exploitation before destruction were investigated. As a result of the studies carried out for each sample, the phase composition was determined (qualitatively and quantitatively), and the following parameters of the fine structure were calculated: volume fractions of structural components of steel, scalar ρ and excess ρ_{\pm} dislocation density, curvature-torsion of the crystal lattice χ , amplitude of internal stresses (shear stress and long-range stresses). All quantitative parameters of the fine structure are determined both in each structural component of steel, and in general for each sample. The structure of the metal of all specimens after deformation before the formation of zones of stable localization of deformations consists of a ferrite-pearlite mixture, and for specimens after operation before fracture only of unfragmented and fragmented ferrite. Ferrite, which occupies the bulk of the material, is present both unfragmented and fragmented. For all samples, the ratios $\rho \geq \rho_{\pm}$, $\chi = \chi_{pl}$, $\sigma_L \geq \sigma_d$ were calculated, which indicate whether there is a danger of the initiation of microcracks in metal samples. For specimens without operation and after operation without damage in zones of stable localization of deformations, these conditions are met, and for specimens after operation until destruction they are not met.

Keywords: structural-phase state, internal stress fields, dislocation density, deformation localization zone, long-term operation, heat-resistant steel

Acknowledgements: author expresses gratitude to Smirnov A.N., professor of the Department of Mechanical Engineering Technology of KuzSTU, Danilov V.I., senior researcher of Laboratory of Strength Physics, Institute of Physics and Applied Mathematics SB RAS, Popova N.A. and Nikonenko E.L., employees of the Department of Physics and Technology of TSASU for their assistance in discussing the research results.

For citation: Ababkov N.V. Study of the structural-phase state and internal stresses in zones of localized deformation of samples made of heat-resistant steel. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):135–141. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-135-141](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-135-141)

Введение

Обеспечение защищенности жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасном производственном объекте является одной из основных задач современной промышленности. Решить эту задачу можно при помощи надежной диагностики и точной оценки остаточного ресурса оборудования. В процессе эксплуатации под действием тяжелых условий энергетического оборудования в металле происходят сложные физико-химические процессы, вызывающие изменение структурно-фазового состояния, зарождение и накопление микродефектов, которые приводят впоследствии к разрушению элементов и узлов оборудования [1; 2].

По официальным данным на начало 2024 г. доля оборудования, выработавшего свой ресурс, составляет 49 %, а для некоторых групп оборуду-

дования может достигать 95 %. При этом количество такого оборудования с каждым годом увеличивается, а наибольшее количество аварий и инцидентов на объектах котлонадзора приходится на Сибирский федеральный округ. По результатам анализа причин аварий и инцидентов, происшедших за последние пять лет, трубопроводы пара и горячей воды остаются одними из самых аварийных объектов с избыточным давлением, несмотря на отсутствие опасных факторов (взрывоопасность, пожароопасность и присутствие токсичных сред) [2].

Анализ основных причин аварий и инцидентов в период 2019 – 2024 гг. показывает, что наличие положительных заключений экспертов по промышленной безопасности (ПБ) не гарантирует безопасность оборудования. Менее 10 % случаев (аварий и инцидентов) связаны с эксплуатацион-

ными дефектами оборудования, а почти 40 % – с низким качеством обслуживания, проверки, диагностики и экспертизы ПБ оборудования [3].

В настоящее время разрабатываются методы неразрушающего контроля, направленные на изучение структурного состояния. Установлены важные зависимости количественных показателей структурно-фазового состояния с параметрами перспективных методов неразрушающего контроля. Разработан ряд критериев для предельных состояний как основного металла, так для и наплавленного металла, а также металла сварных соединений на основе этих зависимостей.

Так как эти критерии связаны с предельным состоянием оборудования, поэтому рассматриваемые параметры нуждаются в уточнении. Кроме того, анализ как структурно-фазового состояния, так и механических свойств металла в энергетическом оборудовании после длительной эксплуатации может повысить точность и достоверность проводимой оценки. Важно установить характерные зоны, предшествующие разрушению или места локализации деформаций [4].

Цель настоящей работы заключается в исследовании структурно-фазового состояния и внутренних напряжений в зонах локализации деформации образцов из теплоустойчивой стали марки 12Х1МФ.

Методы и принципы исследования

Для проведения заявленного исследования использовали образцы, взятые из гнutoго участка паропровода перед выпускным клапаном после эксплуатации без разрушения сроком 260000 ч, а также образцы, вырезанные из трубы змеевика конвективного пароперегревателя КПП-1 с разрушением после эксплуатации сроком 263 000 ч. Геометрия образцов соответствовала форме dog-bone размером рабочей области $40 \times 6 \times 3$ мм. Микроструктуру анализировали с помощью оптического микроскопа Neophot-21, оснащенного цифровой технической видеокамерой UCМOS03100KPA. Механические характеристики измеряли при комнатной температуре на испытательной машине Walter + Bai AG LFM-125 при постоянной скорости на одноосное растяжение. Скорость перемещения подвижного захвата составляла 0,4 мм/мин (квазистатический тест). Одновременно с растяжением методом цифровой корреляции изображений (DIC) [4 – 6] регистрировали картины локализации деформации. Такой метод реализовывали с применением видеокамеры PL-B781F и лазера SNF-xxx-635-30-KB. Для сравнения аналогичные эксперименты проводили на образцах, взятых из труб того же размера, но которые не были в эксплуатации (состояние без эксплуатации) [7; 8].

Были проведены исследования с помощью просвечивающей электронной микроскопии образцов после пластической деформации [9; 10]. В результате исследований для каждого образца был определен фазовый состав (качественный и количественный), а также рассчитаны параметры структуры (объемные доли структурных составляющих стали, скалярная плотность ρ дислокаций и избыточная плотность ρ_{\pm} дислокаций, кривизна-кручение кристаллической решетки χ , амплитуды внутренних напряжений (сдвиговых и дальнедействующих)) [11; 12]. Все количественные структурные параметры определяли как для каждого структурного компонента стали, так и для каждого образца в целом.

Основные результаты

Результаты исследования структуры образцов металла в зонах устойчивой локализации деформации показали, что именно на этих участках материала при одноосном растяжении произошли наибольшие изменения. Установлено, что на ранней стадии нагружения формирование подвижных фронтов локализации деформации, связанной с перемещением полос Чернова – Людерса в эксплуатировавшем металле, не происходит, а зоны устойчивой локализации макродеформации возникают задолго до появления видимых шеек разрушения [13 – 16]. Расположение таких зон совпадает с местом, где в последствии происходит разрушение.

Состояние без эксплуатации

В зонах локализации деформации матрица стали марки 12Х1МФ в состоянии без эксплуатации представлен α -фазой (твердый раствор углерода и легирующих элементов в α -Fe с ОЦК кристаллической решеткой). Морфологические компоненты α -фазы следующие: 5 % перлита и 95 % феррита (70 % фрагментированного феррита) (рис. 1). Дислокационная субструктура между ферритными слоями сетчатая. Вследствие деформации произошло как разрушение цементитных пластин, так и увеличение скалярной плотности дислокаций между ферритными слоями ($\rho = 3,43 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$), что привело к дальнейшей поляризации дислокационной структуры. Амплитуда кривизны-кручения кристаллической решетки феррита $\chi = 560 \text{ см}^{-1}$, избыточная плотность дислокаций $\rho_{\pm} = 2,24 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, в перлите сохраняется условие $\rho > \rho_{\pm}$.

Состояние после эксплуатации без разрушения

Матрица стали марки 12Х1МФ в состоянии после эксплуатации (260 тыс. ч) без разрушения также как и для состояния без эксплуатации в зонах

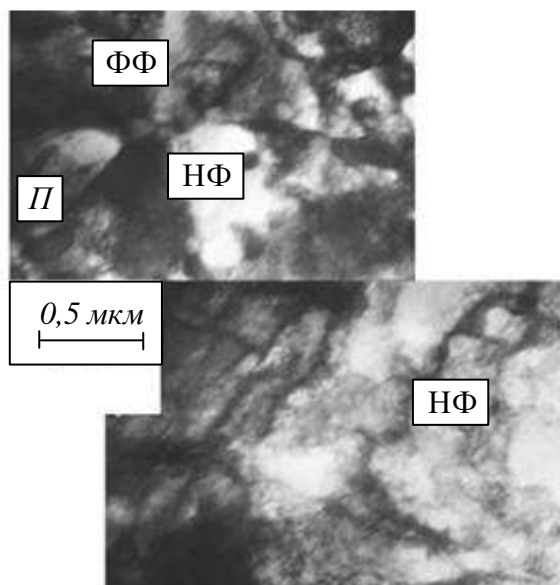


Рис. 1. Теплоустойчивая сталь марки 12Х1МФ (состояние без эксплуатации; П – зерно перлита; НФ – зерно нефрагментированного феррита; ФФ – зерно фрагментированного феррита)

Fig. 1. Heat-resistant steel grade 12X1MF (condition without operation; П – grain of pearlite; НФ – grain of unfragmented ferrite; ФФ – grain of fragmented ferrite)

локализации деформации представляет собой α -фазу (твердый раствор углерода и легирующих элементов в α -Fe с ОЦК кристаллической решеткой). Морфологическими составляющими α -фазы являются перлит (22 %) и феррит (78 %; 63 % фрагментированного феррита) (рис. 2). В зоне локализованной деформации перлит практически полностью разрушен. Объемная доля цементита в перлитных зернах составляет 4,8 %.

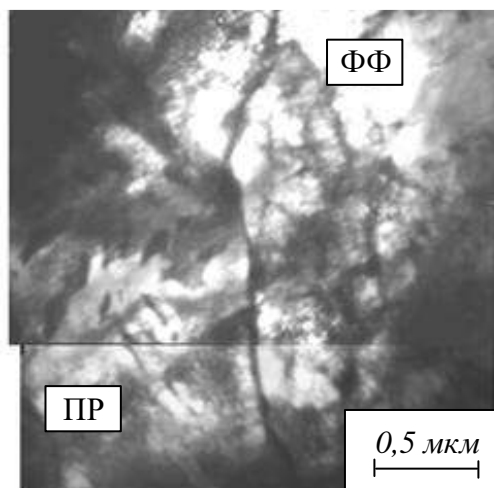


Рис. 2. Теплоустойчивая сталь марки 12Х1МФ (состояние после длительной эксплуатации (260 тыс. ч) без разрушения; ПР – разрушенный перлит; ФФ – фрагментированный феррит)

Fig. 2. Heat-resistant steel grade 12X1MF (condition after prolonged operation (260 thousand hours) without destruction; ПР – destroyed pearlite; ФФ – fragmented ferrite)

Дислокационная субструктура в прослойках феррита сетчатая. Скалярная плотность дислокаций составляет $3,25 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Дислокационная структура в перлитных зернах поляризована. Амплитуда кривизны-кручения χ составляет 455 см^{-1} , избыточная плотность дислокаций $\rho_{\pm} 1,82 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, $\rho > \rho_{\pm}$. Средняя амплитуда напряжения сдвига $\sigma_{\text{д}} = 360 \text{ МПа}$, средняя амплитуда дальнедействующих (локальных) напряжений $\sigma_{\text{л}} = 270 \text{ МПа}$ ($\sigma_{\text{л}} > \sigma_{\text{д}}$). Это означает, что изгиб-кручение кристаллической решетки феррита в зернах перлита также создает дислокационную структуру и носит чисто пластический характер [17].

Состояние после эксплуатации и разрушения

Микроструктура стали марки 12Х1МФ существенно изменилась после эксплуатации: доля перлитного компонента значительно снизилась, а средний размер перлитных колоний уменьшился в 2 раза. Тенденция снижения содержания перлита в образцах в состоянии после разрушения еще более ярко выражена. Микроструктура стали в этом состоянии представлена смесью феррита с низким содержанием карбидов (рис. 3), объемная доля которого составляет 100 % (95 % фрагментированного феррита).

При количественной оценке таких параметров микроструктуры металла образцов из стали марки 12Х1МФ как плотность дислокаций (скалярная и избыточная) и амплитуд полей внутренних напряжений (касательных и моментных) (см. таблицу) в зонах локализации деформации условия $\rho > \rho_{\pm}$ и $\sigma_{\text{л}} > \sigma_{\text{д}}$ выполняются только для состояния без эксплуатации. В зонах локализации деформации для состояний после эксплуатации (260 тыс. ч) без разрушения и после эксплуатации 263 тыс. ч) и разрушения расчеты не выполняются.

Общей закономерностью формирования зон локализации деформаций для теплоустойчивых сталей является достижение критических значений фрагментированной субструктуры, а выявление зон локализации деформации для оборудования является обоснованным как для вновь вводимого оборудования, так для оборудования, находящегося в процессе длительной эксплуатации [18 – 20].

Выводы

Установлено, что структура металла всех образцов после деформации до образования зон устойчивой локализованной деформации состоит из феррита и перлита, а для образцов после разрушения в процессе длительной эксплуатации только из фрагментированного и нефрагментированного феррита. Для всех исследованных образцов были рассчитаны соотношения (ρ

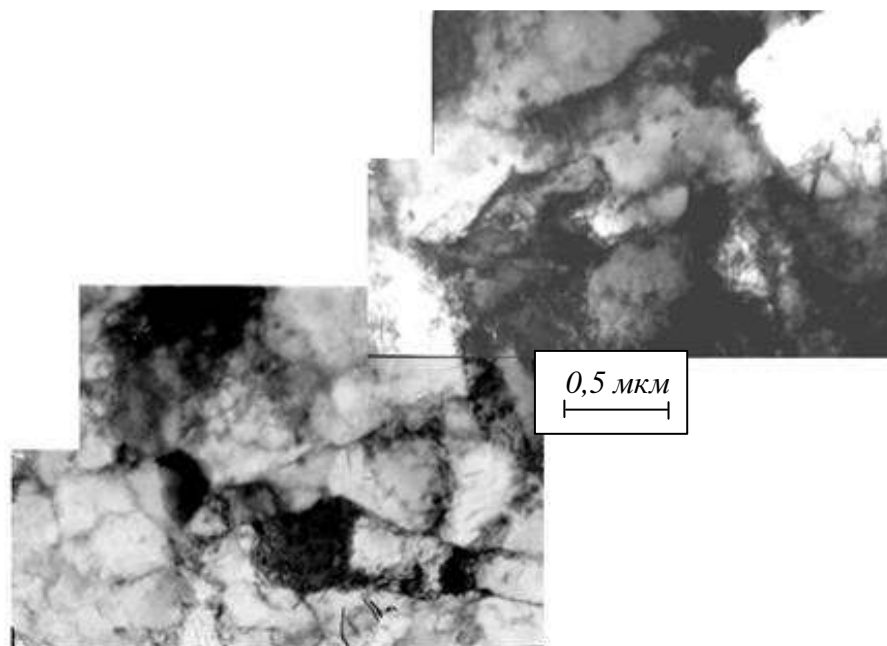


Рис. 3. Теплоустойчивая сталь марки 12X1МФ (образец после длительной эксплуатации до разрушения)
 Fig. 3. Heat-resistant steel grade 12X1MF (sample after prolonged operation before destruction)

$\geq \rho_{\pm}$, $\chi = \chi_{пл}$, $\sigma_{л} \geq \sigma_{д}$) для того, чтобы определить есть ли риск зарождения микротрещин. Эти условия выполняются для образцов без эксплуатации и после нее без повреждений в зонах устойчивой локализованной деформаций, а для образцов после разрушения в процессе длительной эксплуатации нет. Общей закономерностью формирования зон локализации деформаций для теплоустойчивой стали марки 12X1МФ является достижение критических значений фрагментированной субструктуры (60 – 95 %), а выявление зон локализации деформации для оборудования является обоснованным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клюев В. В. *Дегградация диагностики без-опасности*. Москва: Издательский дом «Спектр». 2012:128. EDN: SFDDCN.

2. Багмутов В.П., Белов Е.Г., Божко И.А., Будовских Е.А., Ващук Е.С. и др. Структурно-фазовые состояния перспективных металлических материалов. Новокузнецк: Изд-во НПК. 2009:613. EDN: SNBGKB.

3. Rezinskikh V.F., Grin' E.A. Reliability and safety of thermal power stations in Russia at the present stage: problems and future objectives. *Thermal Engineering*. 2010;57:1–8. <https://doi.org/10.1134/S0040601510010015>

4. Зуев Л. Б., Данилов В.И., Баранникова С.А., Плосков Н.А. О природе упругопластического инварианта деформации. *Журнал технической физики*. 2018;88(6):855–859.

5. Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Zuev L.B. On the kinetics of mobile Chernov–Luders band fronts. *AIP Conference Proceedings*. 2016;1783:020035. <https://doi.org/10.1063/1.4966328>

Количественные параметры микроструктуры металла исследованных образцов из теплоустойчивой стали в зоне локализации деформации (метод просвечивающей электронной микроскопии) Quantitative parameters of the metal microstructure of the studied samples of heat-resistant steel in the deformation localization zone (transmission electron microscopy method)

Состояние	Параметры микроструктуры				
	ρ_{-2} см ⁻²	$\rho_{\pm, -2}$ см ⁻²	χ_{-1} см ⁻¹	$\sigma_{л}$ МПа	$\sigma_{д}$ МПа
Состояние без эксплуатации	$3,41 \cdot 10^{10}$	$2,24 \cdot 10^{10}$	560	368	298
Состояние после эксплуатации (260 тыс. ч) без разрушения	$3,00 \cdot 10^{10}$	$2,52 \cdot 10^{10}$	630	330	405
Состояние после эксплуатации (263 тыс. ч) и разрушения (на расстоянии 30 мм от трещины)	$2,07 \cdot 10^{10}$	$1,95 \cdot 10^{10}$	572	277	427

6. Gorbatenko V.V., Danilov V.I., Zuev L.B. Elastoplastic transition in material with sharp yield point. *AIP Conference Proceedings*. 2015; 1683:020058. <https://doi.org/10.1063/1.4932748>
7. Смирнов А.Н., Абабков Н.В., Глинка А.С., Логов А.Б. Акустические и физико-механические показатели теплоустойчивой стали в окрестности трещины. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2011;10:40–45.
8. Ababkov N., Smirnov A., Danilov V., Zuev L., Popova N., Nikonenko E. Structural-phase state, mechanical properties, acoustic and magnetic characteristics in the sustainable deformation localization zones of power equipment made of structural and heat resistant steels. *Metals*. 2021;11(10):1638. <https://doi.org/10.3390/met11101638>
9. Козлов Э.В., Тришкина Л.И., Попова Н.А., Конева Н.А. Место дислокационной физики в многоуровневом подходе к пластической деформации. *Физическая мезомеханика*. 2011;14(3):95–110.
10. Пикеринг Ф.Б. *Физическое материаловедение и разработка сталей*. Москва: Металлургия. 1982:182
11. Смирнов А.Н., Козлов Э.В., Абабков Н.В., Купченко М.В. Современное методическое обеспечение для оценки состояния металла потенциально опасного оборудования. Часть 1. Микроскопия и рентгеноструктурный анализ. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2010;4:62–68.
12. Иванов Ю.Ф., Лычагин Д.В., Громов В.Е., Целлермаер В.В., Соснин О.В., Коваленко В.В., Коновалов С.В. Мезоскопическая субструктура и электроимпульсное подавление усталостного разрушения. *Физическая мезомеханика*. 2000;1(3):103–108.
13. Danilov V.I., Orlova D.V., Zuev L.B. On the kinetics of localized plasticity domains emergent at the pre-failure stage of deformation process. *Materials and Design*. 2011;32:1554–1558. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.09.031>
14. Zuev L.B. Chernov–Luders and Portevin–Le Chatelier deformations in active deformable media of different nature. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2017;58(2):328–334. <https://doi.org/10.1134/S0021894417020171>
15. Danilov, V.I., Smirnov A.N., Gorbatenko V.V., Orlova D.V., Danilova L.V. Luders Deformation in Weld Joints. *Steel in Translation*. 2018;48(2):87–92. <https://doi.org/10.3103/S0967091218020031>
16. Konovalov S., Ivanov Y., Gromov V. Fatigue-induced evolution of AISI 310S steel microstructure after electron beam treatment. *Materials*. 2020;13(20): 1–13. <https://doi.org/10.3390/ma13204567>
17. Утевский Л.М. *Дифракционная электронная микроскопия в металловедении*. Москва: Металлургия. 1973:584.
18. Gromov V.E., Yur'ev A.B., Morozov K.V., Ivanov Yu.F., Alsaraeva K. V. Structure, phase composition, and defect substructure of differentially quenched rail. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2014;44(12):883–885. <https://doi.org/10.3103/S0967091214120067>
19. Popova N.A., Potekaeв A.I., Nikonenko E.L., Klopotov A.A., Bayatanova L.B., Nikonenko A.V., Kislitsin S.B. Phase Composition and Thin Structure of Steel Surface after Plasma Electrolytic Carbonitriding. *Russian Physics Journal*. 2020;62(10):1794–1800. <https://doi.org/10.1007/s11182-020-01908-9>
20. Kozlov E.V., Popova N.A., Pekarskaya E.E., Koneva N.A., Zhdanov A.N. Subgrain structure and internal stress fields in UFG materials: problem of Hall – Petch relation. *Materials Science and Engineering: A*. 2004;1–2:789–794. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.12.081>

REFERENCES

1. Klyuev V.V. *Degradation of safety diagnostics*. Moscow: Izdatel'skii dom «Spektr». 2012:128. EDN: SFDDCN. (In Russ.).
2. Bagmutov V.P., Belov E.G., Bozhko I.A., Budovskikh E.A., Vashchuk E.S. and others . Structural and phase states of promising metallic materials. Novokuznetsk: Izd-vo NPK. 2009:613. EDN: SNBGKB. (In Russ.).
3. Rezinskikh V.F., Grin' E.A. Reliability and safety of thermal power stations in Russia at the present stage: problems and future objectives. *Thermal Engineering*. 2010;57:1–8. <https://doi.org/10.1134/S0040601510010015>
4. Zuev L.B., Danilov V.I., Barannikova S.A., Ploskov N.A. On the nature of the elastoplastic invariant of deformation. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2018;88(6):855–859. (In Russ.).
5. Danilov V.I., Gorbatenko V.V., Zuev L.B. On the kinetics of mobile Chernov–Luders band fronts. *AIP Conference Proceedings*. 2016;1783:020035. <https://doi.org/10.1063/1.4966328>
6. Gorbatenko V.V., Danilov V.I., Zuev L.B. Elastoplastic transition in material with sharp yield point. *AIP Conference Proceedings*. 2015; 1683:020058. <https://doi.org/10.1063/1.4932748>

7. Smirnov A.N., Ababkov N.V., Glinka A.S., Logov A.B. Acoustic and physico-mechanical properties of heat-resistant steel in the vicinity of the crack. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2011;10:40–45. (In Russ.).
8. Ababkov N., Smirnov A., Danilov V., Zuev L., Popova N., Nikonenko E. Structural-phase state, mechanical properties, acoustic and magnetic characteristics in the sustainable deformation localization zones of power equipment made of structural and heat resistant steels. *Metals*. 2021;11(10):1638. <https://doi.org/10.3390/met11101638>
9. Kozlov E.V., Trishkina L.I., Popova N.A., Koneva N.A. The place of dislocation physics in a multi-level approach to plastic deformation. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2011;14(3):95–110. (In Russ.).
10. Pikering F. B. *Physical metallurgy and steel engineering*. Moscow: Metallurgiya. 1982:182. (In Russ.).
11. Smirnov A.N., Kozlov E.V., Ababkov N.V., Kupchenko M.V. Modern methodological support for assessing the metal condition of potentially dangerous equipment. Part 1. Microscopy and X-ray diffraction analysis. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2010;4:62–68. (In Russ.).
12. Ivanov Yu.F., Lychagin D.V., Gromov V.E., Tsellermaer V.V., Sosnin O.V., Kovalenko V.V., Konovalov S.V. Mesoscopic substructure and electrical pulse suppression of fatigue failure. *Fizicheskaya mezomekhanika*. 2000;1(3):103–108. (In Russ.).
13. Danilov V.I., Orlova D.V., Zuev L.B. On the kinetics of localized plasticity domains emergent at the pre-failure stage of deformation process. *Materials and Design*. 2011;32:1554–1558. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.09.031>
14. Zuev L.B. Chernov–Luders and Portevin–Le Chatelier deformations in active deformable media of different nature. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2017;58(2):328–334. <https://doi.org/10.1134/S0021894417020171>
15. Danilov, V.I., Smirnov A.N., Gorbatenko V.V., Orlova D.V., Danilova L.V. Luders Deformation in Weld Joints. *Steel in Translation*. 2018;48(2):87–92. <https://doi.org/10.3103/S0967091218020031>
16. Konovalov S., Ivanov Y., Gromov V. Fatigue-induced evolution of AISI 310S steel microstructure after electron beam treatment. *Materials*. 2020;13(20): 1–13. <https://doi.org/10.3390/ma13204567>
17. Utevskii L. M. *Diffraction electron microscopy in metallography*. Moscow: Metallurgiya. 1973:584. (In Russ.).
18. Gromov V. E., Yur'ev A. B., Morozov K. V., Ivanov Yu. F., Alsaraeva K. V. Structure, phase composition, and defect substructure of differentially quenched rail. *Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2014;44(12):883–885. <https://doi.org/10.3103/S0967091214120067>
19. Popova, N. A., Potekaev A. I., Nikonenko E. L., Klopotov A. A., Bayatanova L. B., Nikonenko A. V., Kislitsin S. B. Phase Composition and Thin Structure of Steel Surface after Plasma Electrolytic Carbonitriding. *Russian Physics Journal*. 2020;62(10):1794–1800. <https://doi.org/10.1007/s11182-020-01908-9>
20. Kozlov, E. V., Popova N.A., Pekarskaya E.E., Koneva N.A., Zhdanov A.N. Subgrain structure and internal stress fields in UFG materials: problem of Hall–Petch relation. *Materials Science and Engineering: A*. 2004;1–2:789–794. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2003.12.081>

Сведения об авторе

Николай Викторович Абабков, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой технологий машиностроения, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

E-mail: ababkovnv@kuzstu.ru

ORCID: 0000-0003-0794-8040

SPIN-код: 2309-4988

Information about the author

Nikolai V. Ababkov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Prof., Head of the Department of Mechanical Engineering Technologies, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

E-mail: ababkovnv@kuzstu.ru

ORCID: 0000-0003-0794-8040

SPIN-код: 2309-4988

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 22.01.2024

После доработки 08.02.2024

Принята к публикации 12.02.2024

Received 22.01.2024

Revised 08.02.2024

Accepted 12.02.2024

Оригинальная статья

УДК 622.7.017:620.1

DOI 10.57070/2307-4497-2024-1(47)-142-149

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЖЕЛЕЗОРУДНОМ КОНЦЕНТРАТЕ,
ПРОФИЛАКТИРОВАННОМ ИЗВЕСТЬЮ**

© 2024 г. Н. И. Кувшинникова, А. А. Пермяков, М. В. Темлянцев

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

Аннотация. Выполнены технолого-минералогические исследования железорудного концентрата мокрой магнитной сепарации до, во время и после профилактирования обожженным известняком. Показано, что вода в составе профилактированного концентрата имеет сложный гетерогенный раствор, в котором присутствуют ионы Ca^{2+} , $(\text{OH})^-$, H^+ , а также коллоидно-дисперсные частицы CaO , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Fe_2O_4 и других минералов. Установлено, что частицы минералов профилактированного концентрата образуют между собой локально ориентированные агрегаты, а вода в процессе профилактирования становится структурированной. Выполненные дифференциально-термические анализы концентрата мокрой магнитной сепарации с добавлением разного количества извести (от 4 до 14 %). Установлено, что испарение воды в концентрате начинается с двадцать четвертой минуты после добавления извести и сопровождается большим количеством тепла. При этом скорость и температура процесса испарения воды зависит от количества извести, вносимой во влажный концентрат. Проведенные исследования позволили установить, что в процессе профилактирования концентрата испарение влаги протекает более интенсивно в первые четыре часа и в зависимости от массы добавляемого обожженного известняка влажность концентрата уменьшается на 0,3 – 1,0 %. Установлено, что дальнейшее уменьшение влаги в концентрате происходит за счет скрытой теплоты кристаллизации и минералообразования. Опытным путем установлено, что полное естественное высыхание концентрата в теплое время года длится примерно 160 – 250 ч (при температуре 20 °С).

Ключевые слова: профилактирование, влага, концентрат, обезвоживание, сушка, гидратация, обезвоживание, обожженный известняк, известь, портландит

Для цитирования: Кувшинникова Н.И., Пермяков А.А., Темлянцев М.В. Физико-химические процессы в железорудном концентрате, профилактированным известью. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):142–149. [http://doi.org/10.57070/2307-4497-2024-1\(47\)-142-149](http://doi.org/10.57070/2307-4497-2024-1(47)-142-149)

Original article

**PHYSICO-CHEMICAL PROCESSES IN IRON ORE CONCENTRATE,
PREVENTED BY LIME**

© 2024 N.I. Kuvshinnikova, A.A. Permyakov, M.V. Temlyantsev

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

Abstract. Technological and mineralogical studies of the iron ore concentrate of wet magnetic separation were performed before, during and after prophylaxis with calcined limestone. It is shown that the water in the composition of the prophylactic concentrate has a complex heterogeneous solution in which Ca^{2+} , $(\text{OH})^-$, H^+ ions are present, as well as colloidal dispersed particles of CaO , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Fe_2O_4 and other minerals. It has been established that the mineral particles of the prophylactic concentrate form locally oriented aggregates among themselves, and the water becomes structured during prophylaxis. Differential thermal analyses of wet magnetic separation concentrate with the addition of different amounts of lime (from 4 to 14 %). It has been established

that the evaporation of water in the concentrate begins from the twenty-fourth minute after the addition of lime and is accompanied by a large amount of heat. At the same time, the speed and temperature of the water evaporation process depends on the amount of lime introduced into the wet concentrate. The conducted studies allowed us to establish that during the prophylaxis of the concentrate, moisture evaporation proceeds more intensively in the first four hours and, depending on the mass of the burnt limestone added, the moisture content of the concentrate decreases by 0.3 – 1.0 %. It was found that a further decrease in moisture in the concentrate occurs due to the latent heat of crystallization and mineral formation. It has been experimentally established that the complete natural drying of the concentrate in the warm season lasts about 160 – 250 hours (at a temperature of 20 °C).

Keywords: prophylaxis, moisture, concentrate, dehydration, drying, dehydration, dehydration, burnt limestone, lime, portlandite

Для цитирования: Kuvshinnikova N.I., Permyakov A.A., Temlyantsev M.V. Physico-chemical processes in iron ore concentrate, prevented by lime. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):142–149. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-142-149](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-142-149)

Введение

Рудообогатительные предприятия реализуют технологию получения профилактированного концентрата путем добавления обожженного на агломерационной машине известняка к влажному (около 8,5 %) концентрату мокрой магнитной сепарации (ММС) с целью уменьшения влажности для предотвращения его смерзания при транспортировке [1]. Влага в концентрате является следствием применяемой схемы и негативно сказывается на его конечных свойствах [2]. Она является балластом при транспортировке в морозное время, приводит к смерзанию концентрата в прочный монолит, снижая качество и затрудняя его отгрузку потребителем. Для уменьшения влажности товарного железорудного концентрата большинство предприятий используют барабанные сушилки, однако уменьшение влаги в товарном концентрате мокрой магнитной сепарации возможно также путем введения в его состав обожженного известняка непосредственно на обогатительной фабрике [3 – 15].

Одной из актуальных научно-практических задач является управление физико-химическими, минералообразующими процессами, а также оценка качественных показателей профилактированного концентрата. Для решения этих проблем в Лаборатории экологии и комплексного использования минеральных отходов Сибирского государственного индустриального университета были выполнены комплексные технолого-минералогические исследования проб концентрата до, в процессе и после профилактирования известью с целью выявить закономерность протекания физико-химических процессов при профилактировании концентрата [16].

Основные результаты

В процессе исследований установлено, что вода во влажном концентрате аномальна в от-

ношении многих физических свойств. С понижением температуры ниже 4 °C удельный объем воды увеличивается, а плотность уменьшается. При превращении воды в лед объем возрастает на 10 %. Теплоемкость воды аномально велика, но при кристаллизации (замерзании) она уменьшается приблизительно в два раза. Скрытая теплота кристаллизации (332,43 кДж/кг) также аномально велика. Эти ее свойства очень полезны при профилактировании концентрата. Теплота парообразования при низкой температуре сравнительно велика (2500 кДж/кг при температуре 0 °C, а при 100 °C она понижается до 2300 кДж/кг). Испаряясь, концентрат интенсивно охлаждается [17 – 19].

Вода во влажном концентрате представляет гетерогенный ионно-коллоидный раствор. Структура воды аномально изменена под действием электромагнитных, но главным образом магнитных полей вокруг и между частицами магнетитового концентрата. В проходящем поляризованном свете нерудные минералы концентрата просвечивают, а рудные непрозрачны (рис. 1).

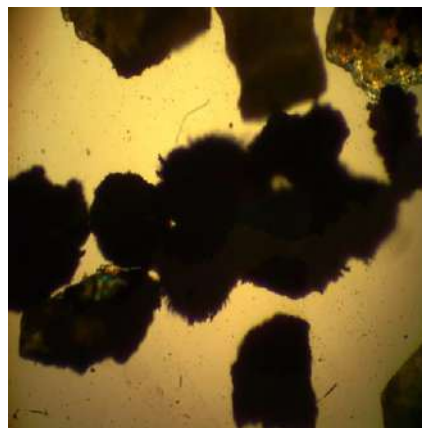


Рис. 1. Обломки магнетита (увеличение $\times 200$, проходящий свет)
Fig. 1. Fragments of magnetite (magnification $\times 200$, passing light)

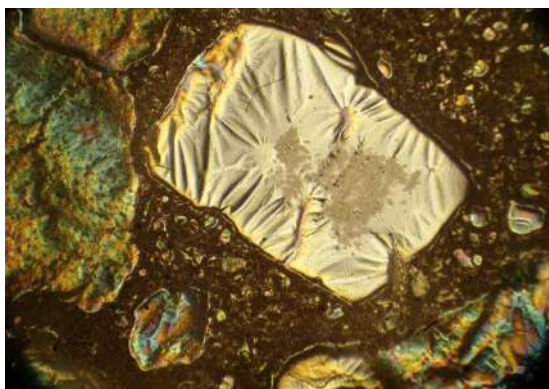


Рис. 2. Электромагнитные поля магнетита (черное) образуют жидкокристаллические агрегаты (светлые слева) (увеличение $\times 200$, николи скрещены)

Fig. 2. The electromagnetic fields of magnetite (black) form liquid crystal aggregates (light on the left) (magnification $\times 200$, nicoli crossed)

Субперпендикулярно поверхности обломков магнетита налипли тонкие его частицы в соответствии с ориентацией магнитных силовых линий. В концентрате в относительно слабо минерализованной воде не видна ее структура, аномально измененная магнитным полем. Однако всегда следует учитывать существование в концентрате сложных и постоянно локально меняющихся магнитных и электромагнитных полей. Под воздействием магнитных полей частицы магнетита ориентировано прилегают друг к другу, образуя ассиметричные, ветвистые цепочки. Они образуют достаточно крупные электромагнитные поля, положительно влияющие на процесс профилактирования, особенно на начальной стадии.

При взаимодействии с известью вода превращается в концентрированный гетерогенный раствор, в котором присутствуют ионы Ca^{2+} , $(\text{OH})^-$, H^+ и другие, а также коллоидно-дисперсные частицы CaO , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, FeFe_2O_4 и других минералов. Они несут определенный заряд и создают вокруг себя электромагнитное и микрогравитационное поля определенной конфигурации. Электромагнитные поля ионов и коллоидных частиц, взаимодействуя с магнитными полями макрочастиц в профилактируемом концентрате, образуют достаточно крупные жидкокристаллические поля, видимые в поляризованном свете под микроскопом (рис. 2). Образование этих полей указывает, что частицы концентрата образуют между собой локально ориентированные агрегаты, а вода в процессе профилактирования становится структурированной. Вследствие этого на поверхности рудных обломков образуются эпитаксиальные дендритные нарастания портландита.

Процесс профилактирования концентрата характеризуется кинетикой обезвоживания. Влажность смеси в зависимости от исходной влажности

концентрата и количества добавленного обожженного известняка понижается на 0,3 – 1,0 %. При смешивании концентрата ММС массой m_k и влажностью W_k с сухим горчим обожженным известняком массой $m_{\text{изв}}$, влажность профилактируемого концентрата W_n уменьшается:

$$W_n = \frac{W_k m_k}{m_k + m_{\text{изв}}} \quad (1)$$

При взаимодействии горячего обожженного известняка с влажным концентратом мокрой магнитной сепарации начинается испарение влаги, которое усиливается в результате экзотермической реакции гашения активной извести. Большая часть воды испаряется на начальной стадии профилактирования концентрата. Видимое испарение наблюдается на конвейерном тракте, особенно в моменты каскадного пересыпания с одного конвейера на другой, в бункер или вагон. Источником энергии на испарение воды является горячий (выше 200 °С) обожженный известняк, но главным образом тепло, выделяющееся в процессе экзотермической реакции образования гидроминералов при взаимодействии воды влажного концентрата с компонентами обожженного известняка. Локально температура реакции взаимодействия оксида $\text{CaO}_{\text{акт}}$ с водой может достигать 460 °С.

Для определения количества испарившейся воды и кинетики испарения в лабораторных условиях были проведены эксперименты. В одинаковые металлические контейнеры одновременно загружали навески влажного концентрата и горячего обожженного известняка массой 4, 6, 8, 10, 12 и 14 % от массы исходного концентрата [20; 21]. Навески обожженного известняка подготавливали заранее и нагревали в печи до температуры 250 °С. После смешивания и периодически в определенное время контейнеры с полученными смесями лабораторно офлюсованного концентрата взвешивали с точностью до 0,01 г и измеряли в них температуру.

Пробы концентрата без извести и профилактированного обожженным известняком массой 6, 8 и 12 % от массы исходного концентрата были исследованы с помощью дифференциально-термического анализа. Он показал, что испарение воды во влажном концентрате начинается при температуре 24 °С и в течение 2 мин медленно нарастает до 70 °С. Начиная с этой температуры, поглощение тепла, а, следовательно, испарение (кипение), заметно возрастает, через минуту эндотермический эффект достигает своего пика при температуре 105 °С. Гравиметрическая кривая показывает, что масса испарившейся воды составляет 6 % от массы исходного

концентрата. Эндотермический эффект испарения воды очень четкий и резкий. Это указывает, что вода во вторичном концентрате мокрой магнитной сепарации содержит очень мало растворенных веществ, то есть является практически чистой, свободной от коллоидно-дисперсных частиц. Испарение воды в концентрате мокрой магнитной сепарации, отмечаемое ДТА потерей массы по гравиметрической кривой, начинается с температуры 32 °С, а заканчивается при 108 °С, равномерно усиливаясь с ростом температуры. Эндотермический эффект, связанный с испарением воды из концентрата, завершается при температуре 180 °С в течение 6 мин.

В профилированном концентрате процесс испарения длится 15 – 18 мин (рис. 3), почти в 3 раза медленнее, чем в исходном. Это обусловлено тем, что на эндотермический процесс нагревания и испарения воды накладывается экзотермический процесс гидратации извести и образование портландита. По нисходящим линиям ДТА эндотермический процесс в первые 5 – 7 мин преобладает над экзотермическим и достигает своего максимального значения при разных температурах в зависимости от количества извести, добавленной на профилирование. При добавке 6 % извести эндотермический пик отмечается при температуре 82 °С; при добавке 8 и 12 % извести – при 92 и 94 °С. Поглощаемая энергия на испарение в концентратах (исходный концентрат мокрой магнитной сепарации, К6, К8 и К12) по

данным ДТА пропорционально сокращается – 20,12; –4,21; –3,95 и –3,74 μV .

Правее эндотермического пика пологонаклонная восходящая кривая ДТА показывает, что экзотермический процесс гидратации или образования портландита постоянно преобладает над процессом испарения. Кроме того, начинается экзотермический процесс окисления магнетита, обусловленный повышенной температурой и процессом кислотно-основного взаимодействия оксидов железа и кальция. Термогравиметрические восходящие кривые на протяжении всего начального процесса показывают неуклонное увеличение массы, обусловленное гидратацией оксида СаО, образованием портландита и окислением железа в железорудных минералах. Однако на этих восходящих кривых при температуре $105 \pm 0,5$ °С отмечается незначительный отрицательный прогиб, уменьшающийся с повышением основности профилированного концентрата. Именно этот прогиб показывает, что в профилированном концентрате еще сохраняется свободная гидратная вода, но ее количество обратно пропорционально количеству добавленного обожженного известняка.

Вода с повышением температуры диффундирует активнее, взаимодействуя с оставшимся оксидом СаО. Она образует новые порции портландита, способствуя упорядочению его структуры. Образование портландита и окисление желе-

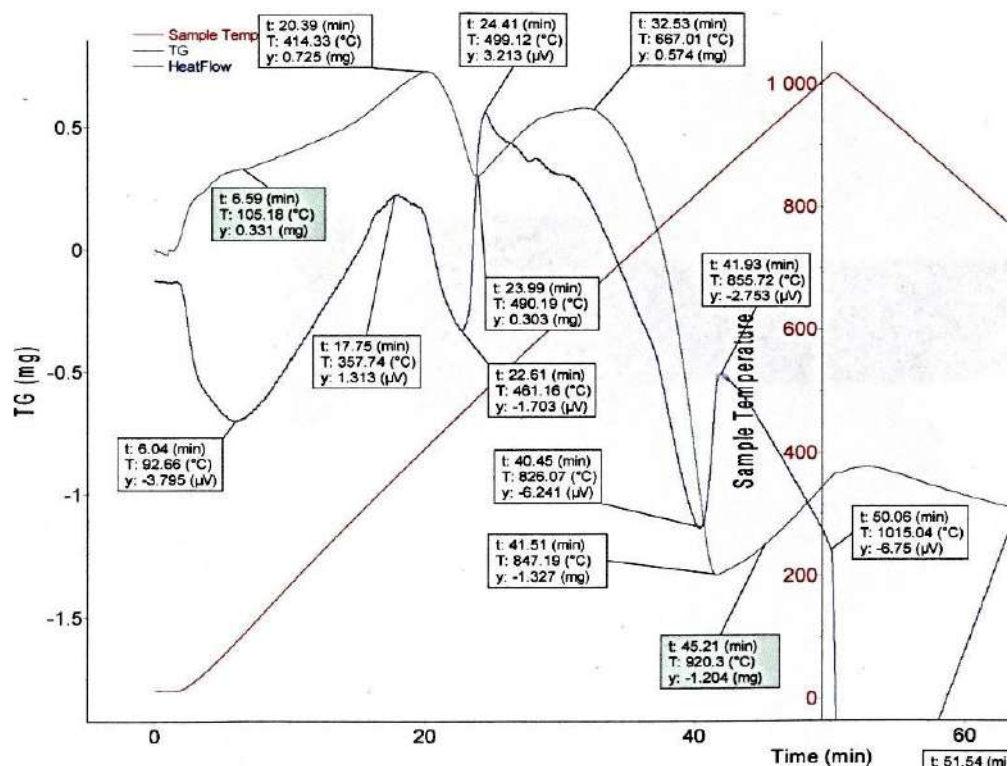


Рис. 3. ДТА концентрата (проба 1306.3), профилированного 8 % извести
Fig. 3. DTA of concentrate (sample 1306.3), prevented by 8 % lime

зородных минералов сопровождается выделением большого количества энергии за счет скрытой теплоты кристаллизации, а за счет окисления закисного железа существенно возрастает масса концентрата. Оба эти процесса экзотермические. Четкая закономерность от увеличения основности концентрата не наблюдается.

При дальнейшем повышении температуры начинается дегидратация портландита, начало которой находится в прямой зависимости от основности концентрата. В концентрате K_6 дегидратация начинается при температуре 458,71 °С, а в K_{12} – при 472,3 °С. Дегидратация сопровождается поглощением большого количества энергии –1,843; –3,016; –3,964 μV для концентратов K_6 , K_8 и K_{12} . Испарение воды при этом увеличивается с ростом основности концентрата, так как пропорционально основности увеличивается количество портландита. В табл. 1 указана масса выделившейся воды: первое (без скобок) определено по ДТА, однако оно явно занижено, так как на него накладываются значения одновременно действующих экзотермических процессов; в скобках приведено второе значение –

расчетное количество воды, выделившееся при дегидратации портландита.

Далее при повышении температуры следуют несколько экзотермических процессов, связанных с выделением энергии при кристаллизации кальцооксида и дальнейшего окисления железосодержащих минералов. Причем кальцооксид играет ведущую роль. Энергия экзотермических процессов на этой стадии пропорционально увеличивается с ростом основности (+3,534; +4,916; +6,289 для концентратов K_6 , K_8 и K_{12}).

Последняя стадия превращений ДТА соответствует разложению кальцита. С увеличением температуры на этой стадии выявили несколько маленьких эндотермических эффектов, обусловленных разложением гидросиликатов и гидрокарбонатов. Отсутствие количественной закономерности на этом этапе говорит о том, что количество кальцита может быть случайным. Пониженная температура диссоциации кальцита подтверждает, что в момент агломерации и профилактирования возможно образование вторичного или новообразованного кальцита. Высокотемпе-

ДТА на воздухе профилактированного концентрата
DTA in the air of a prophylactic concentrate

Процесс	Энергия			Термогравиметрия			Содержание воды, %
	°С	μV	$\Sigma, \mu V$	°С	mg	Σ, mg	
<i>Опыт 1306.2, концентрат K_6</i>							
Испарение	82,49	–3,32	–3,32	105,44	+0,349	+0,349	–
Окисление, кристаллизация	380,16	+1,832	+5,143	412,05	+0,73	+0,381	–
Дегидратация портландита	458,71	–0,011	–1,843	478,66	+0,546	–0,184	0,31 (0,62)
Окисление, кристаллизация	495,6	+3,523	+3,534	659,25	+0,892	+0,346	–
Диссоциация кальцита	781,25	–2,469	–5,992	822,01	+0,394	–0,498	0,83
<i>Опыт 1306.3, концентрат K_8</i>							
Испарение	92,66	–3,795	–3,795	105,18	+0,331	+0,331	–
Окисление, кристаллизация	357,74	+1,313	+5,108	414,33	+0,725	+0,394	–
Дегидратация портландита	461,16	–1,703	–3,016	490,19	+0,303	–0,422	0,7 (1,4)
Окисление, кристаллизация	499,12	+3,213	+4,916	667,01	+0,574	+0,271	–
Диссоциация кальцита	826,07	–6,241	–9,454	847,19	–1,327	–1,901	3,17
<i>1306.5, концентрат K_{12}</i>							
Испарение	94	–3,789	–3,789	105,22	+0,253	–	–
Окисление, кристаллизация	394,4	+2,467	+6,249	412,33	+0,475	+0,222	–
Дегидратация портландита	472,3	–1,486	–3,964	485,77	–0,14	–0,489	0,815 (1,63)
Окисление, кристаллизация	499,35	4,803	+6,289	572,18	+0,112	+0,252	–
Диссоциация кальцита	794,58	–1,926	–6,729	822,13	–1,461	–1,573	2,62

ратурный конец кривых ДТА иногда показывает наличие первичного кальцита с температурой диссоциации выше 920 °С. Трудность расшифровки данных ДТА обусловлено тем, что нередко накладывается несколько термических эффектов, иногда даже противоположного знака.

На рис. 4 показана кинетика изменения массы профилированного концентрата за счет испарения и сушки. Масса влажного концентрата мокрой магнитной сепарации принята за 100 %, к ней прибавили массу (в %) добавленного обожженного известняка. Через определенные интервалы времени продукты эксперимента взвешивали и определяли результаты изменения массы профилированного концентрата. Эксперимент проводили при комнатной температуре, за исключением интервала после 3 – 8 ч, когда контейнеры были выставлены на мороз. Полученные данные показывают, что в этот период испарение практически прекратилось.

Под воздействием тепла горячего обожженного известняка и экзотермической реакции гидратации оксида СаО до образования портландита испарение наиболее интенсивно происходит на начальной стадии профилирования (рис. 4). С течением времени испарение замедляется, а через 4 ч от начала оно практически завершается. Далее масса концентрата уменьшается за счет испарения-высыхания. Масса концентрата К₁₄ за 4 ч уменьшается более чем на 2 %, а концентрат К₄ становится легче только на 1 % и менее. Концентрат К₁₄ на 1 % становится легче за первые полчаса. В промышленных условиях для определения изменяющейся массы в процессе профилирования можно использовать рис. 4. При профилировании в тепле на процесс испарения накладывается еще процесс сушки, что заметно нивелирует данные. Наиболее контрастно процесс поэтапного испарения проявляется при профилировании концентрата на морозе. При фактическом отсутствии естественной сушки четко видны временные границы испарительного процесса.

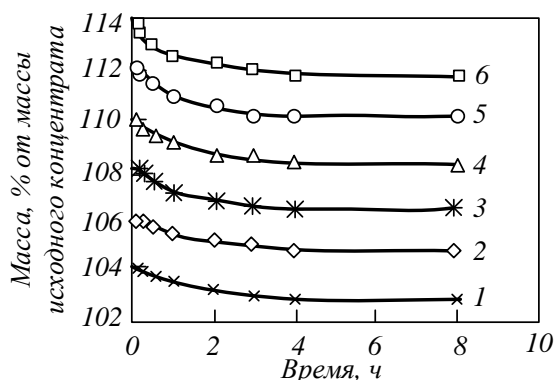


Рис. 4. Кинетика изменения массы профилированного концентрата за счет испарения и сушки:

1 – 6 – 4, 6, 8, 10, 12, 14 % известняк

Fig. 4. Kinetics of mass change of the prevented concentrate due to evaporation and drying:

1 – 6 – 4, 6, 8, 10, 12, 14 % lime

Выводы

Полученные данные хорошо описывают физико-химические процессы, протекающие при профилировании. Процесс профилирования сопровождается выделением большого количества тепла, что в свою очередь приводит к испарению влаги из концентрата после мокрой магнитной сепарации и, как следствие, к сушке концентрата. Испарение воды в процессе профилирования происходит главным образом в первые четыре часа. В последующий период (4 ч) активное испарение прекращается, но изменения в концентрате продолжаются. Продолжается образование портландита, происходит его кристаллизация, сопровождающаяся выделением скрытой теплоты минералообразования и кристаллизации. Поэтому при относительно теплой погоде концентрат в центре насыпной массы вагона оказывается подогретым до 40 °С в момент доставки на предприятие. Полное естественное высыхание концентрата при температуре 20 °С проходит в течение 160 – 250 ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берсенов И.С., Клейн В.И., Зарщиков П.И., Осокин Н.А., Щеглов В.Н. Производство известня на агломерационной машине МАК-90. *Сталь*. 2013;4:2–5.
2. Прохорович В.А., Заостровский А.И. Повышение влагоемкости железорудных концентратов. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2007;4:58–59.
3. Базилевич С.В., Вегман Е.Ф. *Агломерация*. Москва: Металлургия, 1967:367.
4. Бережной Н.Н., Бульчев В.В., Костин А.И. *Производство железорудных окатышей*. Москва: Недра. 1977:240.
5. Пат. 2425155 РФ. *Способ сушки тонкоизмельченного железорудного концентрата* / С.А. Напольских, Р.А. Гельбинг, А.Г. Сухарев; опубл. 27.07.2011.
6. Пат. 2743951 РФ. *Способ предотвращения смерзания влажного железорудного концентрата* / Р.А. Гельбинг, Н.И. Рябов, Д.В. Рыбакин, А.Л. Мамонов, Д.Н. Волков; опубл. 01.03.2021.
7. Wang S., Guo K., Qi S., Lu L. Effect of frictional grinding on ore characteristics and selectivity of magnetic separation. *Minerals Engineering*. 2018;122:251–257.
8. Sivrikaya O., Arol A.I. Use of Colemanite as an Additive in Iron Ore Pelletizing. *Proceeding of 11th. International Mineral Processing Symposium IMPS, Belek*. Antalya. 2008:1121–1127.

9. Hong C., Xing Y., Si Y.X. et al. Lime-Mediated Sewage Sludge and Gas Ash use as Metallurgy Sintering Ingredients. *Advanced Materials Research*. 2013;779-780(9):1623–1628.
10. Gen-Sheng Feng, Sheng-Li Wu, Hong-Liang Han et al. Sintering characteristics of fluxes and their structure optimization. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2011;18(6):270–276.
11. Jeong D., Kim K., Min D. W., Choi W. Freezing-Enhanced Dissolution of Iron Oxides: Effects of Inorganic Acid Anions. *Environmental Science & Technology*. 2015;49(21):12816–12822.
12. Chen H., Yi X., Yan X.S., Wang Z., Guang W.Y., Chang S.Y., Yang L., Xing Q.T., Fan Z., Ana A. Lime-Mediated Sewage Sludge and Gas Ash use as Metallurgy Sintering Ingredients. *Advanced Materials Research*. 2013;779–780(9):1623–1628.
<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.779-780.1623>
13. Feng G., Wu S., Han H., Ma L., Jiang W., Liu X. Sintering characteristics of fluxes and their structure optimization. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2011;18(6):270–276.
<http://dx.doi.org/10.1007/s12613-011-0433-x>
14. Loo C.E., Ellis B.G. Changing bed bulk density and other process conditions during iron ore sintering. *ISIJ International*. 2014;54(1):19–28.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.19>
15. Cores A., Verdeja L.F., Ferreira S., Ruiz-Bustanza I., Mochon S. *Sinterizacion de Minerales de Hierro. Parte 1. Teoria y Practica del proceso*. Dyna. August 2019:152–171.
16. Пермяков А.А., Кувшинникова Н.И., Калиногорский А.Н., Бутов П.Ю., Ганженко И.М., Осокин Н.А. Технологическо-минералогическое исследование кинетики процессов при профилировании концентрата, производимого на Абагурском филиале ОАО «ЕВРАЗРУДА». В кн.: *Металлургия: технологии, управление, инновации, качество. Труды XVII Всероссийской научно-практической конференции*, 8–11 октября 2013. 2013:12–17. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ. EDN: RUPOET.
17. Глинка Н.Л. *Общая химия*. Ленинград: Химия. 1979:688.
18. Эйзенберг Д., Кауцман В. *Структура и свойства воды*. Пер. с англ. Ленинград: Гидрометеиздат, 1975:280.
19. Уэллс А. Структурная неорганическая химия. Т.2. Перевод с английского. Москва: Мир. 1987:696.
20. Филатов С.В., Курунов И.Ф., Семенов О.А., Мансурова Н.Р., Кобелев В.А. Оптимизация расхода извести при вводе в аглошихту с целью повышения качества агломерата. *Сталь*. 2010;10:7–9.
21. Христофоров В.П. Оптимизация расхода извести при производстве агломерата в условиях ОАО «Уральская сталь». *Наука и производства Урала*. 2015;11:16–19.

REFERENCES

1. Bersenev I.S., Klein V.I., Zarshchikov P.I., Osokin N.A., Shcheglov V.N. Production notified to agglomeration machine Mak-90. *Stal'*. 2013;4:2–5. (In Russ.).
2. Prokhorovich V.A., Zaostrovsky A.I. Increasing the moisture capacity of iron ore concentrates. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2007;4:58–59. (In Russ.).
3. Bazilevich S.V., Vegman E.F. *Agglomeration*. Moscow: Metallurgiya, 1967:367. (In Russ.).
4. Bereznoi N.H., Bulychev B.V., Kostin A.I. *Manufacture of iron equipment in the district of Okat*. Moscow: Nedra, 1977:240. (In Russ.).
5. Napol'skikh S.A., Gel'bing R.A., Sukharev A.G. *Method sushki toncommelable Iron Horse-Center*. Pat. 2425155 RF; opubl. 27.07.2011. (In Russ.).
6. Gelbing R.A., Ryabov N.I., Rybakin D.V., Mamonov A.L., Volkov D.N. *A method for preventing freezing of wet iron ore concentrate*. Pat. 2743951 of the RF; publ. 01.03.2021. (In Russ.).
7. Wang S., Guo K., Qi S., Lu L. Effect of frictional grinding on ore characteristics and selectivity of magnetic separation. *Minerals Engineering*. 2018;122:251–257.
8. Sivrikaya O., Arol A.I. Use of Colemanite as an Additive in Iron Ore Pelletizing. Proceeding of 11th. *International Mineral Processing Symposium IMPS, Belek*. Antalya. 2008:1121–1127.
9. Hong C., Xing Y., Si Y.X. et al. Lime-Mediated Sewage Sludge and Gas Ash use as Metallurgy Sintering Ingredients. *Advanced Materials Research*. 2013;779-780(9):1623–1628.
10. Gen-Sheng Feng, Sheng-Li Wu, Hong-Liang Han et al. Sintering characteristics of fluxes and their structure optimization. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2011;18(6):270–276.
11. Jeong D., Kim K., Min D. W., Choi W. Freezing-Enhanced Dissolution of Iron Oxides: Effects of Inorganic Acid Anions. *Environmental Science & Technology*. 2015;49(21):12816–12822.
12. Chen H., Yi X., Yan X.S., Wang Z., Guang W.Y., Chang S.Y., Yang L., Xing Q.T., Fan Z., Ana A. Lime-Mediated Sewage Sludge and Gas Ash use as Metallurgy Sintering Ingredients. *Advanced Materials Research*. 2013;779–

780(9):1623–1628.

<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.779-780.1623>

13. Feng G., Wu S., Han H., Ma L., Jiang W., Liu X. Sintering characteristics of fluxes and their structure optimization. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2011;18(6):270–276. <http://dx.doi.org/10.1007/s12613-011-0433-x>
14. Loo C.E., Ellis B.G. Changing Bed Bulk Density and other Process Conditions during Iron Ore Sintering. *ISIJ International*. 2014;54(1):19–28. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.19>
15. Cores A., Verdeja L.F., Ferreira S., Ruiz-Bustanza I., Mochon S. *Sinterizacion de Minerales de Hierro. Parte 1. Teoria y Practica del proceso*. Dyna. August 2019:152–171.
16. Permyakov A.A., Kuvshinnikova N.I., Kalinogorskii A.N., Butov P.Yu., Ganzhenko I.M., Osokin N.A. Technological-mineralogical and investigated Kinetics process in the Prevention of concentrate produced by Abagur branch OAO "EURASRUDA". In: *Metallurgy: techno-Logies, management, innovation, quality. All-Russian Scientific and practical conferences*, 8-11 October 2013. Novokuznetsk: IIS SibGIU. EDN: RUPOET. 2013:12–17. (In Russ.).
17. Glinka N.L. *General chemistry*. Leningrad: Khimiya, 1979:688.10.
18. Eisenberg D., Kautzman V. *Structure and properties of water*. Translated from English. Leningrad: Hydrometeoizdat. 1975:280.
19. Wells A. *Structural inorganic Chemistry*. Vol. 2. Translated from English. Moscow: Mir. 1987:696.
20. Filatov S.V., Kurunov I.F., Semenov O.A., Mansurova N.R., Koshelev V.A. Optimization of lime consumption when entering the sinter in order to improve the quality of the sinter. *Steel*. 2010;10:7–9. (In Russ.).
21. Khristoforov V.P. Optimization of lime consumption in the production of agglomerate in the conditions of JSC Ural Steel. *Science and production of the Urals*. 2015;11:16–19. (In Russ.).

Сведения об авторах

Наталья Игоревна Кувшинникова, ведущий инженер лаборатории экологии и комплексного использо-

вания минеральных отходов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: n.kuvshinnikova@rambler.ru

SPIN-код: 1117-4629

Арнольд Аркадьевич Пермяков, к.г.-м.н., научный руководитель лаборатории экологии и комплексного использования минеральных отходов, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: permyakovarnold@mail.ru

Михаил Викторович Темлянецев, д.т.н., профессор кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0001-7985-5666

SPIN-код: 6169-5458

Information about the authors

Natal'ya I. Kuvshinnikova, Leading Engineer of the Laboratory of Ecology and Integrated Use of Mineral Waste, Siberian State Industrial University

E-mail: n.kuvshinnikova@rambler.ru

Arnol'd A. Permyakov, Cand. of Geologo-Mineralogical Sciences, scientific supervisor of the Laboratory of Ecology and Integrated Use of Mineral Waste, Siberian State Industrial University

E-mail: permyakovarnold@mail.ru

Mikhail V. Temlyantsev, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University

E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

ORCID: 0000-0001-7985-5666

SPIN-код: 6169-5458

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 20.02.2024

После доработки 27.02.2024

Принята к публикации 01.03.2024

Received 20.02.2024

Revised 27.02.2024

Accepted 01.03.2024

Оригинальная статья

УДК 330.322:338.45:658.26

DOI: 10.57070/2304-4497-2021-1(47)-150-162

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВНЕДРЕНИЯ ИННОВАЦИЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ СЕКТОРЕ УЗБЕКИСТАНА

© 2024 г. Н. М. Набиева

Ферганский политехнический институт (Узбекистан, 150100, Фергана, ул. Ферганская, 86)

Аннотация. Показана значимость инновационной деятельности предприятий в развитии экономики и общества Узбекистана, повышении конкурентоспособности предприятий. На основе анализа источников, посвященных исследованию особенностей инновационной деятельности предприятий различных стран мира, выявлены проблемы внедрения новых технологий на инновационно-ориентированных предприятиях. Представлены результаты исследования нормативно-правовых основ, методов и стратегий внедрения новых технологий на предприятиях энергетической отрасли Узбекистана. Показано, что среди наиболее распространенных в Узбекистане подходов к внедрению инноваций выделяются следующие: применение современных методов управления, формирование инновационной культуры и партнерства с научными и исследовательскими организациями. Проведен анализ внедрения новых технологий на инновационно-ориентированном предприятии Филиале АО НЭС Узбекистана «Ферганские Магистральные Сети». Оценена эффективность внедрения новых технологий на предприятии и идентифицированы факторы, способствующие или препятствующие успешному внедрению инноваций на АО НЭС. Продемонстрировано, что внедрение новых технологий на исследуемом предприятии позволит достичь ряда значимых преимуществ. Оно способствует повышению производительности и эффективности работы предприятия, сокращению времени выполнения задач и снижению издержек производства, обеспечивают улучшение качества выпускаемой продукции или оказываемых услуг, что способствует повышению уровня удовлетворенности клиентов и укреплению конкурентных позиций предприятия на рынке. Внедрение новых технологий в систему деятельности предприятия способствует сокращению негативного воздействия на окружающую среду. Использование современных экологически чистых технологий позволяет снизить выбросы вредных веществ, оптимизировать использование энергии и ресурсов, осуществлять эффективную переработку отходов. Предприятие не только улучшает свою экологическую репутацию, но и вносит значительный вклад в устойчивое развитие и экологическую безопасность региона.

Ключевые слова: энергетическая отрасль, инновация, инновационно-ориентированное предприятие, экономический эффект

Для цитирования: Набиева Н.М. Исследование условий внедрения инноваций в энергетическом секторе Узбекистана. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):150–162. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)150-162](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)150-162)

Original article

THE STUDY OF CONDITIONS FOR THE INTRODUCTION OF INNOVATIONS IN THE ENERGY SECTOR OF UZBEKISTAN

© 2024 N. M. Nabyeva

Ferghana Polytechnic Institute (Uzbekistan, 150100, Ferghana, 86 Ferghanskaya str.)

Abstract. The article shows the importance of innovative activity of enterprises in the development of the economy and society of Uzbekistan, increasing the competitiveness of enterprises. Based on the study of the features of

innovative activity of enterprises in various countries of the world, the problems of introducing new technologies at innovation-oriented enterprises are identified. The results of the study of the regulatory framework, methods and strategies for the introduction of new technologies at the enterprises of the Uzbekistan's energy industry are presented. It is shown that among the most common approaches to innovation in Uzbekistan, the use of modern management methods, the formation of an innovative culture and partnerships with scientific and research organizations are highlighted. The analysis of the introduction of new technologies at the innovation-oriented enterprise "Branch of JSC NES of Uzbekistan Ferghana Backbone Networks" was carried out, the effectiveness of the introduction of new technologies at the enterprise was evaluated and the factors contributing to or hindering the successful introduction of innovations in JSC NES were identified. The authors demonstrate that the introduction of new technologies at the enterprise under study will allow achieving a number of significant advantages. First of all, it helps to increase the productivity and efficiency of the enterprise, reduce the time to complete tasks and reduce production costs, improve the quality of products or services provided, which helps to increase customer satisfaction and strengthen the competitive position of the enterprise in the market. It is also noted that the introduction of new technologies into the system of the company's activities contributes to reducing the negative impact on the environment. The use of modern environmentally friendly technologies makes it possible to reduce emissions of harmful substances, optimize the use of energy and resources, and carry out efficient waste processing. Thus, the company not only improves its environmental reputation, but also makes a significant contribution to the sustainable development and environmental safety of the region.

Keywords: energy industry, innovation, innovation-oriented enterprise, economic effect

For citation: Nabieva N.M. Study of conditions for the introduction of innovations in the energy sector of Uzbekistan. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):150–162. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-150-162](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-150-162)

Введение

Инновационная деятельность в современном мире становится все более актуальной и важной [1 – 12]. Она является одним из ключевых факторов развития экономики и общества в целом. В настоящее время мир меняется с невероятной скоростью, технологии развиваются, а потребности и требования потребителей становятся все более высокими. В таких условиях компании вынуждены активно внедрять новые технологии и разрабатывать новые продукты и услуги, чтобы сохранять свою конкурентоспособность. Компании, которые активно занимаются инновационной деятельностью, не только создают новые продукты и услуги, но и способствуют развитию научных исследований и технологий, а также улучшению качества жизни людей.

Узбекистан стремится решить очень непростую и важную для себя задачу – осуществить переход на инновационный путь развития. Проблема приобрела большую актуальность после выступления президента страны Ш. Мирзиёева по пяти приоритетным направлениям развития Республики Узбекистан на 2022 – 2026 гг., в ходе которого для страны были определены основные направления инновационного развития, отмечены «уязвимые точки» и озвучены результаты необходимых достижений.

Также президентом Республики Узбекистан была установлена амбициозная цель – войти в число 50 передовых стран мира по рейтингу Глобального инновационного индекса до 2030 г.

Для достижения этой цели необходимо адаптировать сферу науки к современным экономическим условиям, что потребует значительных изменений в структуре, организации, кадровом, инфраструктурном и финансовом обеспечении ее развития.

Особенно важно внедрение новых технологий на инновационно ориентированных предприятиях, которые нацелены на создание новых продуктов и услуг. При этом важно учитывать, что внедрение новых технологий может потребовать значительных затрат на обучение персонала, приобретение оборудования и изменение производственных процессов. В связи с этим, изучение вопросов внедрения новых технологий на инновационно ориентированных предприятиях является актуальной темой и может внести большой вклад в развитие современной экономики.

Цель настоящей работы состояла в анализе результатов внедрения новых технологий на инновационно ориентированном предприятии в энергетической отрасли Узбекистана на примере филиала АО НЭС Узбекистана «Ферганские магистральные сети».

Материалы и методы исследования

Следует отметить, что в Узбекистане наблюдается прогресс в области научно-исследовательской и инновационной деятельности за последние три года. Основными факторами этого прогресса были стратегическое видение и политическая поддержка со стороны высшего руко-

водства страны. По последней доступной информации на 2022 г. Узбекистан занимает 82 место в Глобальном инновационном индексе, который составляется ежегодно Всемирной организацией интеллектуальной собственности (WIPO) в сотрудничестве с другими организациями [13]. Для сравнения в 2021 г. Узбекистан занимал 93 место, в 2015 г. – 122 место из 140 [14]. Глобальный инновационный индекс использует 80 различных показателей для оценки инновационного потенциала и достижений стран. Узбекистан показал положительные результаты в следующих областях: институты, человеческий капитал и исследования, инфраструктура, результаты экономики знаний и технологий, результативность творческого труда (рис. 1).

Экономическое понятие «инновационная деятельность» основывается на термине «инновация», который был предложен известным австрийским экономистом Йозефом Шумпетером [15]. Он разработал системные теоретические основы инноваций, показал их важную роль в изменении технологий и управлении. По Шумпетеру термин инновация – это изменение с целью внедрения и использования новых видов потребительских товаров, новых производственных и транспортных средств, рынков и форм организации в промышленности.

Инновация стала широко используемым, но плохо определяемым повседневным термином в XXI веке. Экономика инноваций определяется как часть экономической теории, которая априори утверждает, что экономическое развитие является результатом присвоения знаний, инноваций и предпринимательства, действующих в институциональной среде инновационных систем [16]. Это отличает инновационную экономику от других отраслей экономики, в том числе от господствующей неоклассической теории, которая рассматривает накопление капитала как основной двигатель экономического развития, главным образом в форме экономического роста. В парадигме инновационной экономики социально-экономический мир функционирует как открытая и сложная система, проявля-

ющая тенденции к адаптации. Это контрастирует с неоклассической экономической теорией, рассматривающей экономику как закрытую систему, демонстрирующую тенденции к механическому равновесию.

Важную роль в создании условий осуществления инноваций играет информационная среда (в частности, нормативно-правовое поле) [17; 18]. Для осуществления научно-исследовательских и инновационных работ в Узбекистане приняты законы «О науке и научной деятельности» и «Об инновационной деятельности» [19]. Ответственность за науку, научную и инновационную деятельность возложена на Министерство инновационного развития Республики Узбекистан в соответствии с указанными законами. Кроме того, был разработан проект закона «О стартапах», который будет использоваться для формирования стартап-экосистемы в Узбекистане. За последние три года было разработано и внедрено более 70 нормативно-правовых актов, которые регулируют научное и инновационное развитие в стране.

Согласно статье 3 Закона Республики Узбекистан «Об инновационной деятельности» от 24.07.2020 г. № ЗРУ-630 термин «инновация» трактуется как введенная в гражданский оборот или используемая для собственных нужд новая разработка, применение которой на практике обеспечивает достижение значительного социально-экономического эффекта [20], а инновационная деятельность как деятельность по созданию новых разработок, а также обеспечению их передачи и реализации в сфере производства.

Энергетическая отрасль имеет огромную важность и актуальность для любой страны [21 – 23], включая Узбекистан. По итогам 2022 г. валовый внутренний продукт (ВВП) Республики Узбекистан в текущих ценах составил 888,3 трлн сум и по сравнению с 2021 г. возрос в реальном выражении на 5,7 %. В отраслевой структуре ВВП доля промышленности – 26,7 %, строительства – 6,7 % и сферы услуг – 41,5 % [24]. По итогам 2022 г. в промышленности наблюдается увеличение добавленной стоимости на 5,2 %.

GIIR	GI	Innovation input	innovation output
• 2020	• 93	• 81	• 118
• 2021	• 86	• 75	• 100
• 2022	• 82	• 68	• 91

Рейтинг Узбекистана в Глобальном инновационном индексе в 2020 – 2022 гг.
Uzbekistan's ranking in the Global Innovation Index in 2020 – 2022

Положительная динамика в промышленности в основном обусловлена ростом добавленной стоимости горнодобывающей промышленности и разработки карьеров на 2,1 % и обрабатывающей промышленности на 5,3 %.

В период с 2017 по 2022 гг. потребление электроэнергии выросло с 60,0 до 70,8 млрд кВт·ч. Значительный рост потребления электроэнергии можно объяснить ростом численности населения, а также экономическим ростом. Крупнейшим потребителем электроэнергии является Ташкентская обл. (9,2 млрд кВт·ч). Узбекистан до 2026 г. планирует обеспечить рост экономики в 1,5 раза и довести ВВП как минимум до 100 млрд долларов, будет введено дополнительно 11,5 тысяч МВт новых мощностей по 19 проектам на сумму 6,5 млрд долларов. К 2030 г. доля возобновляемых источников в структуре выработки электроэнергии превысит 30 %. Для подачи электроэнергии в регионы намечено построить 3000 км новых линий электропередачи на 500 и 220 кВт [25]. Кроме того, планируется вывод из эксплуатации устаревших энергоблоков на тепловых электростанциях общей мощностью 6,4 ГВт.

В связи с этим были проведены значительные структурные изменения в топливно-энергетическом комплексе. В начале 2019 г. произошла кардинальная реструктуризация, в результате которой были созданы три акционерных общества (АО «Тепловые электрические станции», АО «Национальные электрические сети Узбекистана» и АО «Региональные электрические сети»).

Основной целью этой реорганизации был переход к современным методам организации производства, транспортировки, распределения и сбыта электрической энергии. Эти изменения направлены на обеспечение более эффективного и надежного функционирования энергетической отрасли и применение передовых методов и технологий в сфере электроэнергетики.

Особое внимание было уделено развитию генерации энергии из возобновляемых источников, что подтверждается принятием Закона «Об использовании возобновляемых источников энергии» и разработкой Концепции развития возобновляемых источников энергии на период 2019 – 2023 гг.

В апреле 2020 г. была утверждена Концепция обеспечения Республики Узбекистан электрической энергией на 2020 – 2030 гг., разработанная Министерством энергетики совместно с другими заинтересованными министерствами, ведомствами и международными консультантами.

Одним из значимых достижений в энергетической отрасли Узбекистана является использо-

вание модели государственно-частного партнерства (ГЧП) при реализации проектов по генерации электроэнергии, включая возобновляемые источники энергии. Сейчас эта модель стала основой для большинства строящихся и планируемых электростанций в стране. Внедрение ГЧП способствует рыночным преобразованиям в энергетическом секторе.

Проекты на основе ГЧП реализуются посредством конкурентных тендеров, что означает использование рыночных принципов. Международные финансовые институты, включая Международную финансовую корпорацию (IFC), Азиатский банк развития (ADB) и Европейский банк реконструкции и развития (EBRD), оказывают техническую поддержку для привлечения международного опыта в проведении тендеров.

Победитель тендера, ответственный за проектирование, строительство и эксплуатацию новой электростанции, заключает долгосрочное соглашение о закупке производимой электроэнергии на 20 – 25 лет. Основным критерием для победы в тендере является предложение наиболее выгодной цены (тарифа) на электроэнергию. Однако участники тендера должны предоставить квалификационные доказательства своего опыта, наличия финансовых ресурсов и способности успешно реализовывать и поддерживать такие проекты.

Внедрение рыночных правил, активно осуществляемое в энергетическом секторе Узбекистана в последние три года, способствует здоровой конкуренции между независимыми производителями электроэнергии.

На 2023 г. было заключено 13 соглашений о покупке электроэнергии, что является значительным прорывом в формировании конкурентной среды в энергетическом секторе. Среди независимых производителей энергии, с которыми были заключены соглашения следующие компании: Total Eren SA (Франция), Abu Dhabi Future Energy Company – Masdar (ОАЭ), Aksa Enerji Üretim A.Ş. (Турция), ACWA Power (Саудовская Аравия) и другие.

Благодаря созданию благоприятного инвестиционного климата в Узбекистане, отпала необходимость в привлечении правительственных гарантий для получения кредитов.

В соответствии с Указом Президента Республики Узбекистан от 27 марта 2019 г. № ПП-4249 «О стратегии дальнейшего развития и реформирования электроэнергетической отрасли Республики Узбекистан» [26] был создан Проектный офис при Министерстве, который сотрудничает с международными финансовыми институтами. В рамках работы офиса были привлечены международные эксперты, обладающие значитель-

ным опытом реформирования энергетических отраслей различных стран.

Эксперты Проектного офиса разработали Концепцию, которая включает поэтапный переход к оптовому конкурентному рынку электроэнергии в период с 2021 по 2025 г. Этапы перехода определены и будут реализованы в установленные сроки с целью совершенствования энергетической отрасли Узбекистана.

Также продолжаются работы по совершенствованию нормативно-правовой базы в энергетической отрасли. Особое внимание уделяется экспертизе проектов: Закон Республики Узбекистан «Об электроэнергетике» (разработка ведется совместно с экспертами Европейского банка реконструкции и развития и Всемирного банка), Указ Президента «О дополнительных мерах по реформированию электроэнергетики» и Постановление Правительства «Об утверждении Кодекса магистральных электрических сетей» [27].

В настоящее время в большинстве стран и в Узбекистане уделяется большое внимание модернизации существующих тепло- и гидроэлектростанций с целью повышения энергоэффективности. В разных странах выделяются различные направления развития инноваций в энергетической отрасли в зависимости от текущего состояния предприятий этой отрасли, внутренних и внешних условий реализации инноваций [28 – 32]. Происходит внедрение передовых технологий и оборудования (парогазовых установок, разработанных ведущими мировыми компаниями). Для успешной реализации таких проектов, требующих точных расчетов и учета всех условий (от времени эксплуатации до особенностей каждой теплоэлектростанции), необходимо профессиональное участие сотен отечественных и зарубежных специалистов.

В результате модернизации за последние десять лет (2012 – 2020 гг.) в энергетической системе Узбекистана было введено около 3000 МВт новой производственной мощности, что привело к общей мощности системы на уровне 14131 МВт. Только за последние четыре года было добавлено 3300 МВт. Эти меры направлены на достижение роста мощности энергосистемы до 25600 МВт к 2025 г. и до 29200 МВт к 2030 г.

Параллельно с модернизацией электростанций активно проводится обновление и укрепление передающей инфраструктуры электроэнергетики. За последние годы (2021 – 2022 гг.) было модернизировано и построено около 25 тысяч километров низковольтных линий электропередачи. Также было модернизировано и обновлено около 9 575 единиц трансформаторных пунктов, что составляет 60 % общего числа. В рамках текущего года планируется ремонт более 26300 км

низковольтных линий электропередачи и более 9000 единиц трансформаторных подстанций.

Эти работы осуществляются в соответствии с принятым документом «О мерах по реконструкции и модернизации сетей напряжением 0,4 – 110,0 кВ на 2021 – 2030 гг.», который предусматривает поэтапную модернизацию и обновление более чем 130000 км линий электропередачи и более 40000 единиц трансформаторных пунктов [33].

Узбекистан активно развивает генерацию энергии на основе возобновляемых источников (ВИЭ), особенно солнечной энергии. В рамках десятилетнего плана электроснабжения, разработанного Министерством энергетики совместно с Азиатским банком развития и Всемирным банком, страна стремится увеличить долю возобновляемой энергии в общем объеме производства электрической энергии до 25 % к 2030 г. (в настоящее время она составляет 10 %).

В рамках реализации плана в Узбекистане уже строятся солнечные фотоэлектрические станции (ФЭС). Осенью 2021 г. была введена в эксплуатацию первая солнечная электростанция промышленного масштаба мощностью 100 МВт в Навоийской обл., которая строилась компанией Masdar (ОАЭ). Кроме того, в ближайшие месяцы планируется запуск ФЭС мощностью 100 МВт в Самаркандской обл., инвестором которого является компания Total Eren (Франция).

Один из успешных примеров реализации проектов ВИЭ в Узбекистане связан с программой «Scaling Solar». В рамках этой программы в 2020 г. был объявлен тендер на строительство двух солнечных электростанций мощностью не менее 200 МВт каждая в Самаркандской и Джизакской обл. На тендер подали заявки 83 компании, что свидетельствует о значительном интересе инвесторов к реализации проектов в области возобновляемой энергетики в Узбекистане. Активно реализуются проекты по строительству ветровых электростанций (ВЭС), которые значительно увеличат генерацию энергии из возобновляемых источников. Компания Masdar в настоящее время строит ветровую электростанцию общей мощностью 500 МВт в Тамдынском районе Навоийской обл., и первую часть этого проекта планируется ввести в эксплуатацию в 2024 г.

Компания ACWA Power (Саудовская Аравия) заключила соглашения о строительстве двух ветровых электростанций мощностью 500 МВт каждая в Гиждуванском и Пешкунском районах Бухарской обл. Объем прямых инвестиций в эти проекты составит 1,3 млрд. долларов США, запуск этих ВЭС запланирован на вторую половину 2023 г.

Реализация этих проектов по возобновляемой энергетике в Узбекистане способствует достижению поставленных целей энергетического сектора. Кроме того, такие проекты помогут сократить годовые выбросы парниковых газов примерно на 500000 т эквивалента CO₂.

Последние годы стали прорывными для развития энергетики в Узбекистане, страна активно использует лучший международный опыт, чтобы обеспечить переход энергетического сектора к работе в условиях рыночных отношений. Это позволит гибко реагировать на растущий спрос на энергию и обеспечить энергобезопасность Узбекистана в настоящем и в будущем.

Результаты исследования

Акционерное общество «Национальные электрические сети Узбекистана» создано в соответствии с Постановлением Президента Республики Узбекистан от 27 марта 2019 г. № ПП-4249 «О стратегии дальнейшего развития и реформирования электроэнергетики в Республике Узбекистан». Эта компания входит в структуру Министерства энергетики Республики Узбекистан.

Основными направлениями деятельности общества являются эксплуатация и развитие магистральных электрических сетей Республики Узбекистан, поставка электроэнергии по магистральным электрическим сетям и осуществление межгосударственного транзита, сотрудничество с электроэнергетическими системами соседних государств.

На сегодняшний день в состав АО «НЭС Узбекистана» входит 14 региональных магистральных электрических сетей, служба центральной релейной защиты и автоматики и оказывающие другие услуги функциональные филиалы. На балансе акционерного общества имеется 84 подстанции 220 – 500 кВ, более 11650 км воздушных линий электропередачи напряжением 220 – 500 кВ, численность персонала АО «НЭС Узбекистана» составляет около 4300 человек [34].

Акционерное общество «Национальные электрические сети Узбекистана» играет важную роль в энергетической отрасли Узбекистана. Его основная задача заключается в передаче электрической энергии от производителей к потребителям, обеспечивая энергетическую инфраструктуру страны. Передача электрической энергии является критическим звеном в энергетической системе. Предприятие ответственно за обеспечение безопасной и надежной передачи энергии по магистральным электрическим сетям. Оно также контролирует показатели каче-

ства электрической энергии, чтобы обеспечить нормативные требования и стандарты.

В целом предприятие выполняет широкий спектр функций и задач, необходимых для эффективной работы энергетической отрасли Узбекистана. Его роль заключается в обеспечении стабильного энергоснабжения, развитии и модернизации инфраструктуры, обеспечении безопасности и надежности передачи электрической энергии.

Был проведен анализ передачи электроэнергии от производственных теплостанции к распределительному предприятию (Фергана ПТЭС) для потребления населением за 2011 – 2015 гг (табл. 1). В 2011 – 2015 гг. предприятие не достигало плановых значений потребления электроэнергии, при этом количество сэкономленной электроэнергии варьировалось от 4,038 до 5,059 млн кВт·ч.

На протяжении 2016 – 2022 гг. в компании был реализован ряд мероприятий, направленных на повышение энергоэффективности. Одним из этих мероприятий стала замена водоснабжающих и пожарных насосов на подстанциях Восточных МЭС на современное инновационное оборудование, что позволило сэкономить в среднем 76 032 кВт·ч или 12 млн сум в год с одного насоса (табл. 2).

Еще одним направлением внедрения инноваций на АО «НЭС» является переход на элегазовые выключатели (110 – 500 кВ) вместо воздушных и масляных, что позволяет снизить расход электроэнергии и затраты на трансформаторное масло.

Реализация рассматриваемого проекта обеспечивает экономию электроэнергии в размере 3,5 млн кВт·ч в год. Кроме этого будет экономиться сумма в размере 640,0 млн сум, которая тратится на ремонт. В итоге в год это даст экономию в 1225,9 млн сум или 6129,5 млн сум в 5 лет, 12259 млн сум за 10 лет.

Кроме того, была проведена замена существующих трансформаторов на более современные (табл. 4), что позволяет получить ряд потенциальных преимуществ:

1. Энергоэффективность – современные трансформаторы обычно обладают более высоким уровнем энергоэффективности по сравнению со старыми моделями. Это может привести к снижению потребления электроэнергии и, следовательно, к экономии затрат на электроэнергию.

2. Улучшенная надежность: новые трансформаторы обычно обладают более надежной и

Анализ потребления ТЭР за период с 2011 по 2015 гг.
Table 1. Analysis of fuel and energy consumption for the period from 2011 to 2015

Год		Электроэнергия, тыс. кВт·ч		ГСМ, т	
		Собственные нужды	Хозяйственные нужды	Бензин	Дизельное топливо
2011	План	13209,781	1920,000	192,5	120,6
	Факт	8150,387	1204,025	123,7	58,0
	Экономия	5059,394	715,975	68,8	62,6
2012	План	13219,083	1920,000	188,6	128,9
	Факт	8307,384	1404,535	111,4	35,4
	Экономия	4911,699	515,465	77,2	93,5
2013	План	13217,302	1896,000	146,6	96,7
	Факт	8704,497	1245,954	135,5	39,7
	Экономия	4512,805	650,046	11,1	57,0
2014	План	13206,790	1883,400	135,6	80,4
	Факт	9169,159	1351,597	133,8	28,4
	Экономия	4037,631	531,803	1,8	52,0
2015	План	13341,168	1879,800	124,6	72,7
	Факт	8945,178	1195,447	н/д	н/д
	Экономия	4395,990	684,353	–	–

долговечной конструкцией, что может увеличить их срок службы и снизить вероятность отказов и поломок. Это может привести к сокращению времени простоя и улучшению надежности системы электроснабжения.

3. Технические возможности: современные трансформаторы могут предлагать дополнительные функции и возможности, такие как мониторинг состояния, автоматическая защита и управление. Это может упростить обслуживание и улучшить управляемость системы.

4. Соответствие стандартам: современные трансформаторы обычно соответствуют последним стандартам и нормативным требованиям, что может быть важно с точки зрения соблюдения правил безопасности и энергетической эффективности.

Результат замены существующих трансформаторов на современные повышает надежность передачи электроэнергии, приводит к экономии 13 т трансформаторного масла в год, за 5 лет – 65 т (экономит 292,5 млн сумм), за 10 лет – 130 т.

Реализация Программы энергосбережения на период 2015 – 2022 гг. позволила обеспечить повышение эффективности энергопроизводства, общая экономия за период 2016 – 2022 гг. соста-

вила 30,7 млн т дизельных топлива, 65 т трансформаторного масла, 20 млн кВт·ч электрической энергии. Суммарная экономия от реализации обозначенных проектов по внедрению инноваций составила 6781,3 млн сум.

Выводы

Проведенное исследование подтвердило важность внедрения новых технологий в систему деятельности инновационно-ориентированного предприятия. Результаты анализа могут служить основой для улучшения процесса внедрения новых технологий на предприятии Филиал АО «НЭС Узбекистана Ферганские Магистральные Сети» и повышения его эффективности в энергетической отрасли Узбекистана.

Кроме того, внедрение новых технологий на предприятии Филиал АО «НЭС Узбекистана Ферганские Магистральные Сети» позволит достичь ряда значимых преимуществ. Прежде всего, оно способствует повышению производительности и эффективности работы предприятия, сокращению времени выполнения задач и снижению издержек производства. Новые технологии также обеспечивают улучшение каче-

Оценка экономии от внедрения инновационного оборудования на подстанциях Восточных МЭС в 2017 – 2022 гг.
 Table 2. Assessment of savings from the introduction of innovative equipment at substations of Eastern MES in 2017 – 2022

Подстанция (ПС)	До внедрения			После внедрения				Экономия электроэнергии за год	
	Тип и марка насоса	Мощность, кВт ч	Потребляемая эл. энергия в год, кВт·ч	Тип и марка насоса	Мощность, кВт·ч	Цена оборудования, млн сум	Потребляемая эл. энергия в год, кВт·ч	кВт·ч	млн сум
2017 г.									
ПС «Узгариш»	ЭЦВ-8-40-65 с	11,0	95 040	Unipump ECO-5	2,2	1,7	19 008	76 032	12,72
	ЭЦВ-8-40-65 с	11,0	95 040	Unipump ECO-5	2,2	1,7	19 008	76 032	12,72
ПС «Узбекистан»	ЭЦВ-8-25-140 с	22,0	190 080	Grundfos SQ3-105	6,2	5,2	53 568	136 512	22,85
	ЭЦВ-6-16-140 с	11,0	95 040	Grundfos SQ3-105	6,2	5,2	53 568	41 472	6,94
2018 г.									
ПС «Сокин»	ЭЦВ-6-16-65 с	9,2	79 488	Unipump ECO-5	2,2	1,7	19 008	60 480	10,12
ПС «Паулган»	ЭЦВ-6-16-110 с	32,0	276 480	Grundfos SQ3-105	6,2	5,2	53 568	222 912	37,31
2019 г.									
ПС «Фергана»	ЭЦВ-6-16 110 с	12,	110 592	Grundfos SQ 1-35	3,5	2,8	30 240	80 352	13,45
ПС «Юлдуз»	ЭЦВ-6-16-85 с	6,3	54 432	Grundfos SQ 1-35	3,5	2,8	30 240	24 192	4,04
2022 г.									
ПС «Лочин»	ЭЦВ-6-16-85 с	8,0	69 120	Grundfos SQ 1-35	3,5	2,8	30 240	38 880	6,50
	ЭЦВ-6-16-85 с	8,0	69 120	Grundfos SQ 1-35	3,5	2,8	30 240	38 880	6,50
ПС «Хакент»	VACKSON	7,5	64 800	Unipump ECO-5	2,2	1,7	19 008	45 792	7,66
Здания АТЦ	ЭЦВ-6-16-110 с	12,8	110 592	Grundfos SQ 1-35	3,5	2,8	30 240	80 352	13,45
Итого:	–	–	–	–	–	36,4	–	921 888	154,26

Сравнение воздушных выключателей при замене на элегазовые выключатели

Table 3. Comparison of air switches when replacing with gas switches

Подстанция	Количество	Воздушные выключатели и компрессоры		Элегазовые выключатели			
		Потребление электроэнергии за год, кВт·ч (выкл.)	Потребление электроэнергии за год, кВт·ч (компрес.)	Потребление электроэнергии за год, кВт·ч	Стоимость оборудования, тыс. долл.	Экономия ТЭР за счет обновления оборудования	
						электроэнергия за год кВт·ч	масла и ремонтные расходы, сум
ПС «Сардор»	27	1 310 400	2 282 280	95 004	11 388	3 497 676	1 210 000
ПС «Фергана»	20						
ПС «Узгариш»	21						
ПС «Оби-Хает»	22						
ПС «Юлдуз»	23						
ПС «Лочин»	17						
Итого	130	3 592 680		95 004	11 388	3 497 676	1 210 000

ства выпускаемой продукции или оказываемых услуг, что способствует повышению уровня удовлетворенности клиентов и укреплению конкурентных позиций предприятия на рынке.

Внедрение инноваций также имеет положительное влияние на развитие научных и иссле-

довательских инициатив в организации и отрасли. Оно способствует созданию инновационной культуры, стимулирует инициативу и творческий потенциал сотрудников, а также улучшает их профессиональные навыки. Это позволяет предприятию привлекать высококвалифициро-

Анализ экономии при замене старых трансформаторов на современные

Table 4. Analysis of savings when replacing old transformers with modern ones

ПС	Действующее оборудование до 2015 г.					После реализации проекта по замене				
	шт.	Мощность, мВА	Вместимость масляни- стеи, т	Годовая доливка гр. масла, т	Годовые потери Х/Х, кВт·ч	шт.	Мощность, мВА	Вместимость масляни- стеи, т	Годовая доливка гр. масла, т	Годовые потери Х/Х, кВт·ч
ПС «Фергана»	1	125	52,1	0,5	673920	1	200	56	0,5	682560
ПС «Сокин»	1	125	52,1	0,5	673920	1	200	56	0,5	682560
ПС «Юлдуз»	2	125	104,2	1,2	1347840	2	200	112	1,18	1365120
ПС «Оби-Хает»	2	125	126	1	1347840	2	200	112	1,18	1365120
ПС «Кизил- Равот»	2	125	127	1	1347840	2	200	112	1,18	1365120
Итого			461,40	4,20	5391360			448,00	4,54	5460480

ванных специалистов и обеспечивает долгосрочную устойчивость и конкурентоспособность на рынке труда.

Внедрение новых технологий в систему деятельности предприятия способствует сокращению негативного воздействия на окружающую среду. Использование современных экологически чистых технологий позволяет снизить выбросы вредных веществ, оптимизировать использование энергии и ресурсов, а также осуществлять эффективную переработку отходов. Таким образом, предприятие не только улучшает свою экологическую репутацию, но и вносит значительный вклад в устойчивое развитие и экологическую безопасность региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макогон Ю.В. Инновации на промышленных предприятиях в сфере энергетики. *Управление экономикой: теория и практика*. 2017;9:27–39.
2. Одинаев Ш.Т., Убайдуллозода Ф.Х. Роҳҳои ташкили сармоягузорӣ дар энергетика - ҳаҷмчун омили афзоиш ва Навоварӣ. *Ахбори Академияи илмҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон. Шӯъбаи илмҳои ҷамъиятишиносӣ*. 2021;4(265):132–136.
3. Исакова Д.Е. Технологические и управленческие инновации в энергетике: мировой опыт и Казахстан. В кн.: *Россия: тенденции и перспективы развития*. Институт научной информации по общественным наукам РАН, Отдел научного сотрудничества. 2019:425–429.
4. Сивандаева С.Ю. Инновации в области энергетики России. *Моя профессиональная карьера*. 2019;2(5):296–300.
5. Арлиндо Ко., Романова А.А. Опыт реализации экономных инноваций в странах Африки. В кн.: *Новая экономика: институты, инструменты, тренды. Материалы международной научно-практической конференции*. Орел, 2021:225–228.
6. Сдасюк Г.В., Алексеева Н.Н. Развитие переходной энергетики в Индии: достижения, проблемы, перспективы. *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2022;5:91–102.
7. Моисеенко Е.И. Проблемы внедрения цифровых технологий на предприятиях энергетики Республики Беларусь. В кн.: *Современные тенденции в развитии экономики энергетики. Сборник материалов III Международной научно-практической конференции*. Минск, 2023:216–217.
8. *How the new era of green growth in Europe is impacting jobs*. EY. 2021. – URL: www.ey.com/en_gl/eu-institutions/how-the-new-era-of-green-growth-in-europe-is-impacting-jobs (accessed: 10.06.23)
9. Fothrop A. *Natel Energy Hydroelectric turbine receives support from Breakthrough Energy Ventures*. – URL: <https://www.nsenergybusiness.com/news/natel-energy-hydropower-turbine-funding/#> (accessed: 31.06.2023).
10. Wang C., Kafouros M. What Factors Determine Innovation Performance in Emerging Economies? Evidence from China. *International Business Review*. 2009;6(6):606–616.
11. Streatfeild J. Electricity Investment in Sub-Saharan Africa: A Historical Overview and a Way Forward. *Journal of International Commerce and Economics*. 2018;June. – URL: https://www.usitc.gov/publications/332/journal/electricity_investment_in_ssa-final.pdf. (accessed: 31.06.2023).
12. Tagliapietra S., Bazilian M. The Role of International Institutions in Fostering Sub-Saharan Africa's Electrification. *The Electricity Journal*. 2019;32(2):13–20. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2019.01.016>
13. *Global Innovation Index 2022*. – URL: https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_2000_2022/uz.pdf (accessed: 31.06.2023).
14. *Глобальный инновационный индекс 2021*. – URL: https://www.wipo.int/global_innovation_index/ru/2021/ (Дата обращения: 31.06.2023).
15. Schumpeter J.A. *Capitalism, socialism and democracy*. London: Routledge Publ., 1976:437.
16. Courvisanos J., Mackenzie S. Innovation economics and the role of the innovative entrepreneur in economic theory. *Journal of Innovation Economics & Management*. 2014;2:41–61.
17. Конников Е.А., Кръжко Д.А., Руглов В.П. Информационная среда как центроид управления развитием технологических инноваций в энергетике (на примере ВИЭ). *Естественно-гуманитарные исследования*. 2021;36(4):130–143.
18. Выпханова Г.В., Жаворонкова Н.Г. Инновации в энергетике – организационно-правовые аспекты. *Актуальные проблемы российского права*. 2021;16(1(122));189–203.
19. Закон Республики Узбекистан № ЗРУ-576 «О науке и научной деятельности» от 29.10.2019 г. – URL: <https://lex.uz/ru/docs/4571492> (Дата обращения: 31.06.2023).
20. Закон Республики Узбекистан № ЗРУ-630 «Об инновационной деятельности» от 24.07.2020 г. – URL: <https://lex.uz/ru/docs/4910448> (Дата обращения: 31.06.2023).

21. Кокоев М.Н. Технические инновации и их роль в альтернативной энергетике. *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2022;8(4):20–30.
22. Санеев Б.Г., Майсюк Е.П., Музычук С.Ю. Экологическая оценка применения инноваций в энергетике региона (на примере Иркутской области). *Вестник Волгоградского государственного университета. Экономика*. 2020;22(1):95–107.
23. Белова В.А. Роль инноваций в сфере энергетике. *Синергия Наук*. 2017;16:327–332. – URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_30457522_66708352.pdf (Дата обращения: 31.06.2023).
24. Сколько составил ВВП Республики Узбекистан за 2022 год? – URL: <https://stat.uz/ru/press-tsentr/novosti-goskomstata/34107-2022-yilda-o-zbekiston-respublikasi-yaim-qanchani-tashkil-etdi-2#:~:text=%D0%9F%D0%BE%20%D0%B8%D1%82%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%BC%202022%20%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0%20%D0%B2%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9,%D1%86%D0%B5%D0%BD%D0%B0%D1%85%20%D1%81%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D0%BB%20888%2C3%20%D1%82%D1%80%D0%BB%D0%BD>. (Дата обращения: 31.06.2023).
25. За пять лет планируется довести ВВП Узбекистана минимум до \$100 млрд – президент. – URL: <https://www.gazeta.uz/ru/2021/08/27/energy/> (Дата обращения: 31.06.2023).
26. О стратегии дальнейшего развития и реформирования электроэнергетической отрасли Республики Узбекистан. – URL: <https://lex.uz/ru/docs/4257085> (Дата обращения: 31.06.2023).
27. О дополнительных мерах по внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии малой мощности. – URL: <https://lex.uz/uz/docs/6189043> (Дата обращения: 31.06.2023).
28. Любарская М.А., Меркушева В.С. Влияние геополитических рисков на внедрение инноваций в энергетике. *Экономический вектор*. 2023;1(32):77–81.
29. Сазоненко Д.И. Инновации в сфере энергетики: преимущества и недостатки технологий. *Вестник науки*. 2023;5(7(64)):349–352.
30. Потапова А.Е., Стародубцева О.А. Основные направления развития инноваций в энергетике. В кн.: *Производственный менеджмент: теория, методология, практика. Сборник материалов IX Международной научно-практической конференции*. 2017:249–255.
31. Лебедев В.В. Инновации и технологические достижения в энергетике России. В кн.: *Теоретические и прикладные аспекты в области гуманитарных наук. Материалы V Международной научно-практической конференции. Сер. «Экономика и право»*. Рязань, 2023:101–102.
32. Voronina E.V. Economics and management in power engineering. *Economics and the Paradigm of the New Time*. 2017;2:5–7.
33. О мерах по реализации проекта «Трансформация электроэнергетического сектора и устойчивая передача электроэнергии» с участием Всемирного банка, а также по развитию и повышению эффективности системы магистральных электрических сетей республики Узбекистан. – URL: <https://lex.uz/ru/docs/5849839> (Дата обращения: 31.06.2023).
34. АО «Национальные электрические сети Узбекистана». – URL: <https://www.uzbekistonmet.uz/ru> (Дата обращения: 31.06.2023).

REFERENCES

1. Makogon Yu.V. Innovations at industrial enterprises in the field of energy. *Upravlenie ekonomikoi: teoriya i praktika*. 2017;9:27–39. (In Russ.).
2. Odinaev Sh.T., Ubaidullozoda F.Kh. RoxxOi tashkent sarmoyagu-zorī dar energetika - xamchun omili afzoish va navovarī. *Shu"bai ilmhoi cham"iyatshinosū*. 2021;4(265):132–136. (In Russ.).
3. Iskakova D.E. Technological and managerial innovations in the energy sector: world experience and Kazakhstan. In: *Rossiya: tendentsii i perspektivy razvitiya. Institut nauchnoi informatsii po ob-shchestvennym naukam RAN, Otdel nauchnogo sotrudnichestva*. 2019:425–429. (In Russ.).
4. Sivandaeva S.Yu. Innovations in the field of energy in Russia. *Moya professional'naya kar'era*. 2019;2(5):296–300. (In Russ.).
5. Arlindo Ko., Romanova A.A. The experience of implementing economical innovations in African countries. In: *The New Economy: institutions, tools, trends. Materials of the international scientific and practical conference*. Orel, 2021:225–228. (In Russ.).
6. Sdasyuk G.V., Alekseeva N.N. Razvitie perekhodnoi energetiki v Indii: dostizheniya, problemy, perspektivy. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*. 2022;5:91–102. (In Russ.).

7. Moiseenko E.I. Problems of introducing digital technologies at energy enterprises of the Republic of Belarus. In: *Modern trends in the development of the energy economy. Collection of materials of the III International Scientific and Practical Conference*. Minsk, 2023:216–217. (In Russ.).
8. How the new era of green growth in Europe is impacting jobs. *EY*. 2021. – URL: www.ey.com/en_gl/eu-institutions/how-the-new-era-of-green-growth-in-europe-is-impacting-jobs (accessed: 10.06.23)
9. Fothrop A. *Natel Energy Hydroelectric turbine receives support from Breakthrough Energy Ventures*. – URL: <https://www.nsenergybusiness.com/news/natel-energy-hydropower-turbine-funding/#> (accessed: 31.06.2023).
10. Wang C., Kafouros M. What Factors Determine Innovation Performance in Emerging Economies? Evidence from China. *International Business Review*. 2009;6(6):606–616.
11. Streatfeild J. Electricity Investment in Sub-Saharan Africa: A Historical Overview and a Way Forward. *Journal of International Commerce and Economics*. 2018;June. – URL: https://www.usitc.gov/publications/332/journals/electricity_investment_in_ssa-final.pdf. (accessed: 31.06.2023).
12. Tagliapietra S., Bazilian M. The Role of International Institutions in Fostering Sub-Saharan Africa's Electrification. *The Electricity Journal*. 2019;32(2):13–20. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2019.01.016>
13. *Global Innovation Index 2022*. – URL: https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_2000_2022/uz.pdf (accessed: 31.06.2023).
14. *Global Innovation Index 2021*. – URL: https://www.wipo.int/global_innovation_index/ru/2021/ (accessed: 31.06.2023). (In Russ.).
15. Schumpeter J.A. *Capitalism, socialism and democracy*. London: Routledge Publ., 1976:437.
16. Courvisanos J, Mackenzie S. Innovation economics and the role of the innovative entrepreneur in economic theory. *Journal of Innovation Economics & Management*. 2014;2:41–61.
17. Konnikov E.A., Kryzhko D.A., Ruglov V.P. Information environment as a centroid for managing the development of technological innovations in the energy sector (using the example of renewable energy sources). *Estestvenno-gumanitarnye issledovaniya*. 2021;36(4):130–143. (In Russ.).
18. Vypkhanova G.V., Zhavoronkova N.G. Innovations in the energy sector - organizational and legal aspects. *Aktual'nye problemy rossiiskogo prava*. 2021.16;1(122);189–203. (In Russ.).
19. *Law of the Republic of Uzbekistan No. ZRU-576 "On Science and scientific activity" dated 29.10.2019*. – URL: <https://lex.uz/ru/docs/4571492> (accessed: 31.06.2023). (In Russ.).
20. *Law of the Republic of Uzbekistan No. ZRU-630 "On innovation activities" dated 24.07.2020*. – URL: <https://lex.uz/ru/docs/4910448> (accessed: 31.06.2023). (In Russ.).
21. Kokoev M.N. Technical innovations and their role in alternative energy. *Vestnik nauki i obrazovaniya Severo-Zapada Rossii*. 2022;8(4):20–30. (In Russ.).
22. Saneev B.G., Maisyuk E.P., Muzychuk S.Yu. Environmental assessment of the application of innovations in the energy sector of the region (on the example of the Irkutsk region). *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika*. 2020;22(1):95–107. (In Russ.).
23. Belova V.A. The role of innovations in the energy sector. *Synergy of Sciences*. 2017;16:327–332. – URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_30457522_66708352.pdf (accessed: 31.06.2023). (In Russ.).
24. How much was the GDP of the Republic of Uzbekistan in 2022? – URL: <https://stat.uz/ru/press-tsentr/novosti-goskomstata/34107-2022-yilda-o-zbekiston-respublikasi-yaim-qanchani-tashkil-etdi-2#:~:text=%D0%9F%D0%BE%20%D0%B8%D1%82%D0%BE%D0%B3%D0%B0%D0%BC%202022%20%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0%20%D0%B2%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9,%D1%86%D0%B5%D0%BD%D0%B0%D1%85%20%D1%81%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D0%BB%20888%20C3%20%D1%82%D1%80%D0%BB%D0%BD>. (accessed: 31.06.2023). (In Russ.).
25. *It is planned to increase Uzbekistan's GDP to \$100 billion in five years - President*. – URL: <https://www.gazeta.uz/ru/2021/08/27/energy/> (accessed: 31.06.2023). (In Russ.).
26. *On the strategy for further development and reform of the electric power industry of the Republic of Uzbekistan*. – URL: <https://lex.uz/ru/docs/4257085> (accessed: 31.06.2023). (In Russ.).
27. *On additional measures for the introduction of energy-saving technologies and the development of renewable energy sources of low power*. – URL: <https://lex.uz/uz/docs/6189043> (accessed: 31.06.2023). (In Russ.).

28. Lyubarskaya M.A., Merkusheva V.S. The impact of geopolitical risks on the introduction of innovations in the energy sector. *Ekonomicheskii vektor*. 2023;1(32):77–81. (In Russ.).
29. Sazonenko D.I. Innovations in the energy sector: advantages and disadvantages of technologies. *Vestnik nauki*. 2023;5(7(64)):349–352. (In Russ.).
30. Potapova A.E., Starodubtseva O.A. The main directions of innovation development in the energy sector. In: *Production management: theory, methodology, practice. Collection of materials of the IX International Scientific and Practical Conference*. 2017:249–255. (In Russ.).
31. Lebedev V.V. Innovations and technological achievements in the Russian energy sector. In: *Theoretical and applied aspects in the field of humanities. Materials of the V International Scientific and practical Conference. Ser. "Economics and Law"*. Ryazan', 2023:101–102. (In Russ.).
32. Voronina E.V. Economics and management in power engineering. *Economics and the Paradigm of the New Time*. 2017;2:5–7.
33. *On measures for the implementation of the project "Transformation of the electric energy sector and sustainable transmission of electricity" with the participation of the World Bank, as well as for the development and improvement of the efficiency of the main electric grid system of the Republic of Uzbekistan.* – URL: <https://lex.uz/ru/docs/5849839> (Дата обращения: 31.06.2023). (In Russ.).
34. *JSC "National Electric Networks of Uzbekistan"*. – URL: <https://www.uzbekistonmet.uz/ru> (Дата обращения: 31.06.2023). (In Russ.).
- Сведения об авторах:**
Набиева Нилуфар Муратовна, Pd, и.о. доцента кафедры «Экономика», Ферганский политехнический институт
E-mail: n.nabieva@ferpi.uz
ORCID 0000-0002-2833-3689
- Information about the authors:**
Nilufar M. Nabiyeva, Pd, Acting Associate Professor of the Department of Economics, Fergana Polytechnic Institute
E-mail: boboshko.dy@misis.ru
ORCID 0000-0003-3418-2976
- Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*
The authors declare that there is no conflict of interest.
- Поступила в редакцию 22.09.2023
После доработки 29.09.2023
Принята к публикации 05.10.2023
- Received 22.09.2023
Revised 29.09.2023
Accepted 05.10.2023

Оригинальная статья

УДК 331.5

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-163-170

**ПРОБЛЕМЫ ЗАНЯТОСТИ, БЕЗРАБОТИЦЫ И РАЗВИТИЯ РЫНКА ТРУДА
В КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ**

© 2024 г. С. У. Астанова¹, А. М. Хамзаева²

Ошский технологический университет (Кыргызстан, 723503, Ош, ул. Исанова, 81)

Аннотация. Рынок труда Кыргызской Республики в настоящее время характеризуется нестабильностью и избытком неквалифицированной рабочей силы в регионах, высоким уровнем безработицы и нехваткой квалифицированной рабочей силы. Ситуацию на рынке труда усугубил экономический кризис в результате пандемии COVID-19. В этих условиях необходимо исследование проблем занятости, безработицы и развития рынка труда, а также путей их решения. Цель работы заключается в выявлении основных проблем развития рынка труда Кыргызской Республики на основе анализа тенденций его основных показателей. В работе проведен анализ динамики развития рынка труда Кыргызской Республики и исследован потенциал его развития с использованием системного подхода. В исследовании использованы общие и специальные методы экономической науки: анализ и синтез, логическое обобщение, динамический анализ, графический метод и т.д. По результатам исследования определены проблемы развития рынка труда, в числе которых увеличение уровня безработицы и числа безработных, рост диспропорции между спросом и предложением труда, отсутствие информации по реальным масштабам трудовой миграции, недостаточность мер по повышению занятости и т.д. На основе анализа передовых практик в области повышения занятости и сокращения безработицы предложено: организовать услуги по содействию занятости на постоянной основе; реализовать активную политику занятости; организовать формирование системы качественного профессионального образования, подготовки компетентных кадров; внедрить цифровые технологии в сферу занятости населения.

Ключевые слова: Кыргызская Республика, рабочая сила, занятость, безработица, безработные, рынок труда

Для цитирования: Астанова С.У., Хамзаева А.М. Проблемы занятости, безработицы и развития рынка труда в Кыргызской Республике. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):163–170. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-163-170](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-163-170)

Original article

**PROBLEMS OF EMPLOYMENT, UNEMPLOYMENT AND LABOR MARKET
DEVELOPMENT OF THE KYRGYZ REPUBLIC**

© 2024 S. U. Astanova, A. M. Khamzaeva

Osh University of Technology (81 Isanova Str., Osh, 723503, Kyrgyzstan)

Abstract. The labor market of the Kyrgyz Republic is currently characterized by instability and excess labor in the regions, high unemployment rates and a shortage of qualified labor. The labor market situation has been aggravated by the economic crisis as a result of the COVID-19 pandemic. Under these conditions, we consider it necessary to study the problems of employment, unemployment and labor market development, as well as ways to solve them. The purpose of the article is to identify the main problems in the development of the labor market of the Kyrgyz Republic based on an analysis of trends in its main indicators. The article analyzes the dynamics of the development of the labor market of the Kyrgyz Republic and explores the potential for its development using a systematic approach. The study used general and special methods of economic science: analysis and synthesis, logical generalization, dynamic analysis, graphical method, etc. Based on the results of the study, problems of labor market development were identified, including an increase in the unemployment rate and the

number of unemployed, an increase in the imbalance between labor supply and demand, a lack of information on the real scale of labor migration, insufficient measures to increase employment, etc. Based on an analysis of best practices in the field of increasing employment and reducing unemployment, it was proposed: to organize services to promote employment on an ongoing basis; implement an active employment policy; to form a system of high-quality professional education and training of competent personnel; introduce digital technologies into the sphere of employment.

Key words: Kyrgyz Republic, labor force, employment, unemployment, unemployed, labor market

For citation: Astanova S.U., Khamzaeva A.M. Problems of employment, unemployment and labor market development of the Kyrgyz Republic. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):163–170. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-163-170](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-163-170)

Введение

Рынок труда играет особую роль в социально-экономическом развитии страны, его состояние и развитие определяют качество и уровень жизни населения. Сфера труда имеет решающее значение в развитии национальной экономики, повышении ее конкурентоспособности [1 – 3].

Экономический кризис в стране, вызванный пандемией COVID-19, обострил проблему безработицы, что характерно и для зарубежных экономик [4 – 6]. На данную ситуацию оказало влияние и развитие процессов цифровизации экономики, что отражено в работах Л. Соляровой, А. Жовнира [7], Е. Карта, Е. Адаса [8], Д. Дубровской, Е. Козоноговой [9], Ж. Рахметулиной, А. Урекешевой, А. Айдаровой [10], С. Суебаевой, Е. Медьяровой, Г. Пестуновой [11].

По прогнозам Международной организации труда перспективы рынка труда и показатели глобальной безработицы будут ухудшаться [12]. Вышеизложенное обуславливает необходимость изучения текущего состояния, проблем, тенденций развития и перспектив рынка труда Кыргызской Республики.

Цель настоящей работы заключается в выявлении основных проблем развития рынка труда Кыргызской Республики на основе анализа тенденций его основных показателей.

Основная часть

Рынок труда – это сфера формирования спроса и предложения на рабочую силу, через которую осуществляется купля-продажа рабочей силы. В Законе Кыргызской Республики "О содействии занятости населения" рынок труда определен как механизм, объединяющий работодателя (спрос) и рабочую силу (предложение). Размер и структура рынка труда определяются рабочей силой, которая является его основным участником. Рабочая сила (экономически активное население) – это люди в возрасте 16 лет и старше, которые предлагают свою рабочую силу, в том числе занятые и безработные [13].

В соответствии с законом "О содействии занятости населения" занятость трактуется как любая трудовая деятельность, не противоречащая законодательству Кыргызской Республики, приносящая доход (заработную плату) гражданам, связанная с удовлетворением их личных и общественных потребностей [13]. В этом же законе безработными принято считать граждан трудоспособного возраста, не имеющих работы, заработной платы (доходов), желающих найти подходящую работу и готовых приступить к ней. К категории официальных безработных относятся граждане трудоспособного возраста, зарегистрированные в органах государственной службы занятости, население, не имеющее работы и желающее найти подходящую работу и готовое приступить к ней [13].

Повышение занятости является одной из важнейших целей экономической политики любой страны, поскольку высокий уровень безработицы создает социальную напряженность, усугубляет экономическое неравенство и наносит ущерб экономическому росту. Развитие качества рабочей силы – зеркало социально-экономических, политических процессов, ведущих трендов развития общества, влияющих на рынок труда [14]. Именно поэтому исследование рынка труда должно быть направлено на развитие качества рабочей силы посредством мотивации.

Одной из самых острых проблем рыночной экономики остается безработица, которая влечет за собой снижение жизненного уровня граждан и вызывает социальное напряжение в обществе [15]. Наряду с безработицей острыми проблемами являются нехватка квалифицированной рабочей силы.

К сожалению, рынок труда Кыргызской Республики в настоящее время является нестабильным и характеризуется избытком рабочей силы в регионах, а также дефицитом рабочей силы на локальных рынках труда, о чем свидетельствуют данные официальной статистики и экспертных оценок.

Результаты исследования

Согласно данным Национального статистического комитета, численность экономически активного населения (рабочей силы) Кыргызской Республики на начало 2023 года составило 2712,7 тыс. человек, увеличившись за последние 5 лет на 174 тыс. человек или на 6,9 %, из них численность занятых составляет 2581,1 тыс. человек, рост – на 198,6 тыс. человек или на 8,3 % [16], что положительно сказывается на социально-экономическом развитии страны (табл. 1).

Занятое населения является важнейшим ресурсом, определяющим экономический рост и эффективность развития страны. Уровень занятости определяется как отношение числа занятых к общей численности населения республики старше 15 лет. Данный показатель в Кыргызской Республике в 2022 году составил 57,1 %, что на 0,9 % больше, чем в 2018 году. За рассматриваемый период численность безработных по республике сократилась на 24,7 тыс. человек или на 15,8 %, уровень безработицы снизился на 21 %. Однако количество безработных, имеющих официальный статус, увеличилось на 3,8 тыс. человек, темпы роста составили 105,4 %. При этом официально зарегистрированный уровень безработицы (2,8 %) не изменился.

Показатели уровня занятости значительно различаются по регионам республики (табл. 2).

В разрезе регионов по показателю занятости лидирует Ошская область (68,7 %), далее Таласская область (66,7 %), занято 64 % населения города Бишкек. К регионам ниже среднереспубликанского уровня относятся Иссык-Кульская область (48,9 %), Баткенская и Нарынская области (49,1 %). При этом за последние 5 лет уровень занятости в Джалал-Абадской области значительно вырос (темп роста 111 %), в Ошской, Нарынской, Таласской областях, городах Бишкек и Ош отмечается рост в пределах 1 – 3 %. В Баткенской, Чуйской, Иссык-Кульской областях, напротив, занятость несколько снизилась.

Следует отметить, что подавляющее большинство (более 70 %) людей с общей занятостью работают в неформальном секторе. При этом в городской местности степень неформальности ниже (64,3 %), чем в сельской местности (76,1 %). В разрезе полов мужчины более вовлечены в неформальный сектор, чем женщины (77,2 % против 63,2 %), что обусловлено как общим доминированием мужчин на рынке труда, так и большей долей женщин, работающих в формальном секторе [16]. В связи с этим актуальными в настоящее время задачами государства являются создание новых постоянных рабочих мест, переход от неформального сектора экономики к формальному.

Одним из важных показателей, характеризующих состояние рынка труда, является уровень безработицы. К сожалению, существует разрыв между показателем официальной (зарегистрированной) безработицы и ее реальным уровнем. Динамика уровня безработицы в регионах страны за 2018 – 2022 гг. показана на рисунке (составлено на основе работы [16]).

Так, в 2022 году средний уровень безработицы по стране составил 4,9 %, что на 21 % меньше, чем в 2018 году. Самое высокое значение безработицы зарегистрировано в Джалал-Абадской области (10,8 %), где за последние три года наблюдается рост почти на 80 %. Минимальные показатели безработицы зафиксированы в Ошской (1,5 %), Таласской области (2,3 %) и городе Ош (2,6 %). За 5 лет показатель сократился в Ошской области на 64 %, городе Бишкек – на 40 %, Баткенской, Нарынской, Иссык-Кульской, Чуйской областях – примерно на 35 %. Показатели уровня безработицы в регионах зависят от уровня жизни населения, вида деятельности, типа местности и др. факторов [16].

Отметим, что обострение проблемы занятости особенно отразилось на женщинах и молодежи, в повышении «скрытой» безработицы [17].

Анализ статистических показателей и данных работ позволяет сделать вывод, что на рынке труда Кыргызской Республики существуют следующие проблемы:

- рост числа безработных граждан трудоспособного возраста и повышение уровня безработицы;
- высокий уровень внешней трудовой миграции населения и, как следствие, разрыв между спросом и предложением высококвалифицированных кадров;
- величина масштабов занятости в неформальном секторе экономики по сравнению с формальным сектором;
- отсутствие данных по реальным масштабам безработицы, трудовой миграции;
- недостаточное финансирование мер по повышению занятости.

Если высокий уровень безработицы сопровождается экономическим кризисом, спрос на рабочую силу низкий или недостаточный, государство в этом случае использует меры и программы по созданию условий для увеличения рабочих мест. В этом направлении страна может придерживаться как активной, так и пассивной политики занятости. Пассивная политика на рынке труда ограничивается выплатами государством пособий по безработице, тогда как активная политика на рынке труда включает в себя меры, программы, планы, направленные на

Таблица 1. Рабочая сила в Кыргызской Республике и лица, не входящие в состав рабочей силы в 2018 – 2022 гг.

Table 1. Labor force in the Kyrgyz Republic and persons outside the labor force in 2018-2022

Показатель	Данные по годам					Изменение 2022 г. к 2018 г.	
	2018	2019	2020	2021	2022	Абсол. (+; -)	Темп роста, %
Рабочая сила, тыс. человек	2538,7	2583,6	2595,4	2680,5	2712,7	174	106,9
Численность занятого населения, тыс. человек	2382,5	2442,7	2445,2	2537,9	2581,1	198,6	108,3
Уровень занятости, %	56,2	57,0	56,6	57,1	57,1	0,9	101,6
Количество безработных, тыс. человек	156,3	140,9	150,2	142,6	131,6	-24,7	84,2
Уровень безработицы, %	6,2	5,5	5,8	5,3	4,9	-1,3	79,0
Безработные, имеющие официальный статус, тыс. человек	70,9	76,1	76,7	76,0	74,7	3,8	105,4
Уровень официальной безработицы, %	2,8	2,9	3,0	2,9	2,8	-	100,0
Лица, не входящие в состав рабочей силы, тыс. человек	1703,6	1704,8	1724,4	1764,0	1803,7	100,1	105,9
Рабочая сила в трудоспособном возрасте, тыс. человек	2441,3	2454,1	2447,5	2518,4	2543,7	102,4	104,2
Численность занятого населения в трудоспособном возрасте, тыс. человек	2287,5	2314,1	2299,4	2376,8	2413,4	125,9	105,5
Численность безработных в трудоспособном возрасте, тыс. человек	153,8	140,0	148,2	141,6	130,3	-23,5	84,7
Лица, не входящие в состав рабочей силы в трудоспособном возрасте, тыс. человек	1223,3	1215,8	1231,4	1249,0	1273,0	49,7	104,1
Лица старше трудоспособного возраста и подростки, занятые в экономике, тыс. человек	95,0	128,6	145,8	161,1	167,7	72,7	176,5
Примечание: составлено по данным работы [16].							

обеспечение занятости безработных, включение их в сферу труда.

По результатам исследования политики регулирования занятости в различных странах Е.А. Берляева утверждает, что самой эффективной политикой занятости является японская мо-

дель, а самой популярной – континентальная [17]. По мнению авторов модель Кыргызской Республики близка к российской трудовой модели, в которой сохраняется отпечаток советской эпохи, стабильность занятости ценится выше гарантий достойной оплаты труда.

Таблица 2. Уровень занятости в регионах Кыргызской Республики в 2018 – 2022 гг.

Table 2. Employment rate in the regions of the Kyrgyz Republic in 2018 – 2022

Регион	Данные по годам, %					Изменение 2022 г. к 2018 г.	
	2018	2019	2020	2021	2022	Абсол. (+; -)	Темп роста, %
Баткенская область	52,9	51,4	48,9	49,8	49,1	-3,8	92,8
Джалал-Абадская область	45,4	47,7	47,7	47,5	50,4	5	111,0
Иссык-Кульская область	49,4	48,8	48,8	50,6	48,9	-0,5	99,0
Нарынская область	47,7	48,0	47,6	48,9	49,1	1,4	102,9
Ошская область	66,5	70,3	70,7	70,1	68,7	2,2	103,3
Таласская область	65,4	62,8	64,4	65,2	66,7	1,3	102,0
Чуйская область	54,0	53,5	52,2	53,5	52,1	-1,9	96,5
город Бишкек	63,5	63,2	62,7	63,6	64,0	0,5	100,8
город Ош	51,7	52,0	51,5	51,4	52,6	0,9	101,7
Примечание: составлено по данным работы [16].							

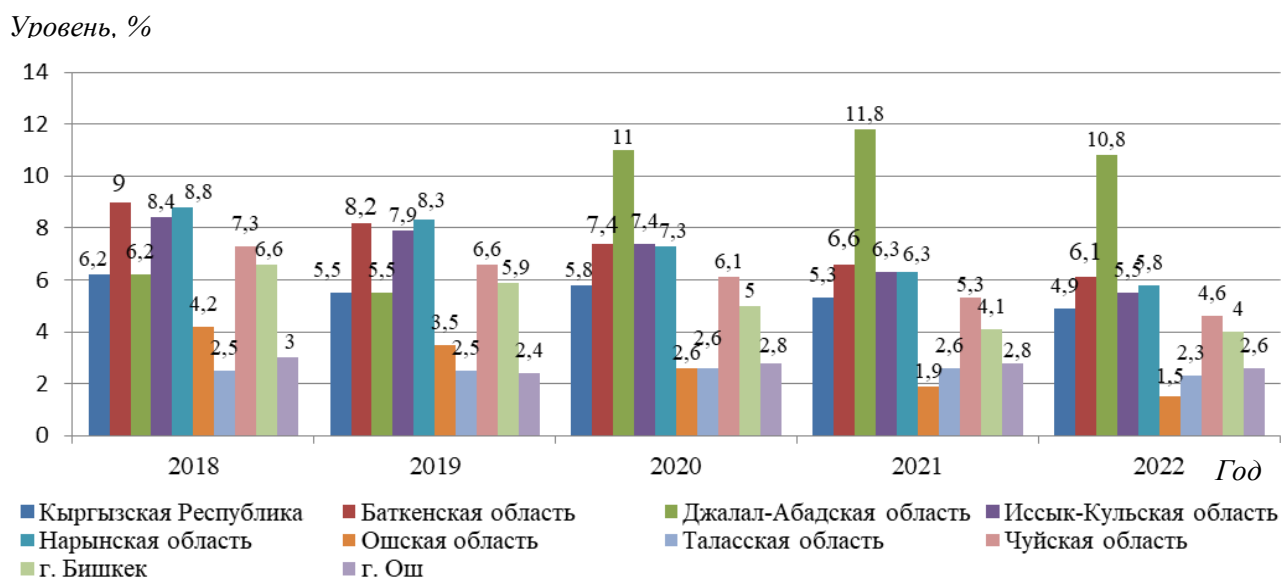


Рисунок. Уровень безработицы в регионах Кыргызской Республики
 Figure. The unemployment rate in the regions of the Kyrgyz Republic

В целом, анализ передовых практик в области повышения занятости и сокращения безработицы показал, что наилучшие результаты дает создание стимулов для формирования новых рабочих мест для предпринимателей, обучение безработных в целях содействия занятости, повышение квалификации, создание субсидируемых рабочих мест, организация ярмарок вакансий.

Правительством Кыргызской Республики предпринимаются определенные меры в данном направлении. В частности, в Национальной стратегии развития Кыргызской Республики на 2018 – 2040 годы, утвержденной Указом Президента Кыргызской Республики от 31 октября 2018 года № 221, в качестве приоритетов обозначены государственная политика занятости, устранение диспропорций между спросом и предложением на рынке труда, повышение качества рабочей силы [19]. В целях реализации данной задачи разработан проект Программы содействия занятости населения на период с 2022 по 2026 годы, реализация которой направлена на достижение восьмой цели ООН в области устойчивого развития – достойный труд и экономический рост – для обеспечения устойчивого экономического роста, обеспечения полноценного и продуктивного труда и занятости всех трудоспособных.

Авторы согласны с выводом исследователей о том, что укрепление экономического сотрудничества Кыргызстана и России способствовало снижению напряжения на рынке труда [20]. Представляет интерес изучение взаимодействия Казахстана и Кыргызстана в области реализации программ по сокращению безработицы и бедности в странах [21].

Приоритетным направлением в современных условиях роста безработицы и дефицита рабочих мест является профессиональное обучение безработных. По данным Государственной службы занятости населения, безработные граждане обучаются на профессии, востребованные на рынке труда (оператор компьютера, повар, косметолог, парикмахер, маникюрша, массажист, бухгалтер, электрогазосварщик, сантехник, швея и др.).

Основными задачами политики занятости должны стать: поддержка занятости отдельных категорий граждан; снижение напряженности на рынке труда; организация профессионального обучения и дополнительного профессионального образования населения [22].

Для развития рынка труда в целом и снижения уровня безработицы предлагаем:

- 1) организовать услуги по содействию занятости на постоянной основе;
- 2) проводить активную политику занятости;
- 3) формировать систему качественного профессионального образования, подготовки компетентных кадров, повышения квалификации и переквалификации кадров;
- 4) активизировать цифровизацию сферы занятости, широко распространить информацию по состоянию рынка труда среди населения [23].

Выводы

Рынок труда Кыргызской Республики характеризуется нестабильностью, избытком рабочей силы в регионах, дефицитом квалифицированной рабочей силы. Высокий уровень безработицы и трудовой миграции являются наиболее острыми социально-экономическими проблемами

ми. Несмотря на то, что в республике предпринимаются значительные усилия по сокращению масштабов безработицы и повышению занятости, в этой области предстоит проделать большую работу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Maksyutova A., Bigaliev A.N. Youth in the labour market of the kyrgyz republic and the republic of Kazakhstan. *М. Рыскулбеков атындагы Кыргыз экономикалык университетинин кабарлары*. 2018;2(44):36–38.
2. Febry W. Identification of local labor market in the context of demographic dividend in Indonesia's urban areas. *Journal of Wellbeing Technologies*. 2023;49(2):55–72.
3. Kazakova V.A. Freelance market as the possible future of labor market. *Economy and Business: Theory and Practice*. 2018;(4):115–117.
4. Янгиров А.В., Мамлеева Э.Р., Трофимова Н.В., Сазыкина М.Ю. Рынок труда в республике Башкортостан в период пандемии. *Экономика и управление: научно-практический журнал*. 2021;2(158):173–179.
5. Dvorak M., Rovny P., Grebennikova V., Faminskaya M. Economic impacts of Covid-19 on the labor market and human capital. *Terra Economicus*. 2020;18(4):78–96.
6. Лейбович А.Н. Covid-19 и рынок труда: старые подходы не работают. *Стандарты и качество*. 2020;5:68–70.
7. Stolyarova L.G., Zhovnir A.I. Impact of digitalization on the labor market. *Вестник Тульского филиала Финуниверситета*. 2022;1:392–394.
8. Kart E., Adas E.B. New technologies and labor market: a look into the future of jobs and employment. *Sociology of Science and Technology*. 2023;14(2):194–208.
9. Dubrovskaya J.V., Kozonogova E.V. The impact of digitalization on the demand for labor in the context of working specialties: spatial analysis. *St Petersburg University Journal of Economic Studies*. 2021;37(3):395–412.
10. Rakhmetulina Zh.B., Urekeshova A.B., Aidarova A.B. Labor market in the context of digitalization. *Вестник университета Туран*. 2022;4(96):130–142.
11. Suieubayeva S.N., Madiyarova E.S., Pestunova G.B. Study of current trends in the labour market: changes caused by digital technologies and the Covid-19 pandemic. *Bulletin of Karaganda University. Economy Series*. 2021;101(1):70–82.
12. Прогноз МОТ на 2024 год: уровень безработицы и социальное неравенство в мире будут расти. 10 января 2024 года. URL: <https://news.un.org/ru/story/2024/01/1448472> (дата обращения 17.02.2024).
13. Закон Кыргызской Республики "О содействии занятости населения". Бишкек, 3 августа 2015 года. № 214. URL: <https://cbd.minjust.gov.kg/111258/edition/1235914/ru> (дата обращения 16.02.2024).
14. Пьянкова Л.А., Затепакин О.А. Качество рабочей силы в современных социально-экономических условиях. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2022;4(42):132–141. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-132-141](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-132-141)
15. Кожемяко С.В., Алпатов Э.С. Современные проблемы и перспективы развития рынка труда. *Московский экономический журнал*. 2023;3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-problemy-i-perspektivy-razvitiya-rynka-truda>. https://doi.org/10.55186/2413046X_2023_8_3_139
16. Национальный статистический комитет Кыргызской Республики. URL: <http://stat.kg/kg/opendata/category/113/> (дата обращения: 16.02.2024).
17. Кулуева Ч.Р., Ташкулова Г.Б. Состояние рынка труда и трудовых ресурсов Кыргызстана. *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана*. 2020;10:109–114. <https://doi.org/10.26104/NNTIK.2019.45.557>
18. Берляева Е.А., Зинченко О.И. Политика занятости: теория и международная практика. В кн.: *Фундаментальные и прикладные аспекты глобализации экономики: Тезисы докладов и выступлений Международной научной конференции студентов и молодых ученых / Под общ. ред. Л.И. Дмитриченко*. Донецк: Донецкий национальный университет, 2020;214–217.
19. Национальная программа развития Кыргызской Республики до 2026 года: утверждена указом президента КР от 12 октября 2021 года УП № 435. URL: <https://cbd.minjust.gov.kg/430700/edition/1096469/ru> (дата обращения 16.02.2024).
20. Жакшылык К. Р., Чылабаева А.К., Аракелян А.А. Влияние экономического сотрудничества Кыргызстана и России на снижение безработицы и роста доходов населения. *Региональная экономика и управление: электронный научный журнал*. 1999;2(74). URL: <https://eee-region.ru/article/7416/>. <https://doi.org/10.24412/1999-2645-2023-274-16> (дата обращения 19.02.2024).
21. Жамбыл Ж.Ж., Чылабаева А.К., Жакшылык К.Р. Регулирование безработицы и социальной

защиты населения Кыргызстана и Казахстана в условиях ЕАЭС. *Региональная экономика и управление: электронный научный журнал*. 1999;4(72).

URL: <https://eee-region.ru/article/7201/>
<https://doi.org/10.24412/1999-2645-2022-472-1> (дата обращения 19.02.2024).

22. Астанова С.У. Кыргыз республикасынын эмгек рыногунун өнүгүшүнүн учурдагы абалы жана көйгөйлөрү. *Известия Ошского технологического университета*. 2023;4:149–155.
 23. Хамзаева А.М., Мырзаibraимова И.Р. К вопросу о тенденциях социального развития Кыргызской Республики в современных условиях. *Актуальные вопросы современной экономики*. 2018;9:297–302. EDN: JLOJBK. (дата обращения 16.02.2024).
- REFERENCES**
1. Maksyutova A., Bigaliev A.N. Youth in the labour market of the kyrgyz republic and the republic of Kazakhstan. *М. Рыскулбеков атындагы Кыргыз экономикалык университетинин кабарлары*. 2018;2(44):36–38.
 2. Febry W. Identification of local labor market in the context of demographic dividend in Indonesia's urban areas. *Journal of Wellbeing Technologies*. 2023;49(2):55–72.
 3. Kazakova V.A. Freelance market as the possible future of labor market. *Economy and Business: Theory and Practice*. 2018;(4):115–117.
 4. Yangirov A.V., Mamleeva E.R., Trofimova N.V., Sazykina M.Y. The labor market in the Republic of Bashkortostan during the pandemic. *Economics and Management: a scientific and practical journal*. 2021;2(158):173–179. (In Russ.).
 5. Dvorak M., Rovny P., Grebennikova V., Faminskaya M. Economic impacts of Covid-19 on the labor market and human capital. *Terra Economicus*. 2020;18(4):78–96.
 6. Leibovich A.N. Covid-19 and the labor market: old approaches do not work. *Standards and quality*. 2020;5:68–70. (In Russ.).
 7. Stolyarova L.G., Zhovnir A.I. Impact of digitalization on the labor market. *Bulletin of the Tula branch of the Financial University*. 2022;1:392–394.
 8. Kart E., Adas E.B. New technologies and labor market: a look into the future of jobs and employment. *Sociology of Science and Technology*. 2023;14(2):194–208.
 9. Dubrovskaya J.V., Kozonogova E.V. The impact of digitalization on the demand for labor in the context of working specialties: spatial analysis. *St Petersburg University Journal of Economic Studies*. 2021;37(3):395–412.
 10. Rakhmetulina Zh.B., Urekeshova A.B., Aidarova A.B. Labor market in the context of digitalization. *Bulletin of the University of Turan*. 2022;4(96):130–142.
 11. Suieubayeva S.N., Madiyarova E.S., Pestunova G.B. Study of current trends in the labour market: changes caused by digital technologies and the Covid-19 pandemic. *Bulletin of Karaganda University. Economy Series*. 2021;101(1):70–82.
 12. ILO forecast for 2024: the unemployment rate and social inequality in the world will grow. January 10, 2024. URL: <https://news.un.org/ru/story/2024/01/1448472> (Accessed 17.02.2024). (In Russ.).
 13. The Law of the Kyrgyz Republic “On the promotion of employment of the population”. Bishkek, August 3, 2015. № 214. URL: <https://cbd.minjust.gov.kg/111258/edition/1235914/ru> (Accessed 16.02.2024). (In Russ.).
 14. Pyankova L.A., Zatepyakin O.A. The quality of the workforce in modern socio-economic conditions. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2022;4(42):132–141. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4\(42\)-132-141](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2022-4(42)-132-141)
 15. Kozhemyako S.V., Alpatova E.S. Modern problems and prospects of labor market development. *Moscow Economic Journal*. 2023;3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-problemy-i-perspektivy-razvitiya-rynka-truda>. (In Russ.). https://doi.org/10.55186/2413046X_2023_8_3_139
 16. National Statistical Committee of the Kyrgyz Republic. URL: <http://stat.kg/kg/opendata/category/113/> (Accessed 16.02.2024). (In Russ.).
 17. Kuluyeva Ch.R., Taskalova G.B. The state of the labor market and labor resources of Kyrgyzstan. *Science, new technologies and innovations of Kyrgyzstan*. 2020;10:109–114. (In Russ.). <https://doi.org/10.26104/NNTIK.2019.45.557>
 18. Belyaeva E.A., Zinchenko O.I. *Employment policy: theory and international practice*. In: *Fundamental and Applied Aspects of Economic globalization: Abstracts of reports and speeches of the International Scientific Conference of Students and Young Scientists*. Dmitrichenko L.I. ed. Donetsk: Donetsk National University, 2020;214–217. (In Russ.).
 19. The National Development Program of the Kyrgyz Republic until 2026: approved by Decree of the President of the Kyrgyz Republic dated October 12, 2021, UP No. 435. URL: <https://cbd.minjust.gov.kg/430700/edition/1096469/ru> (Accessed 16.02.2024). (In Russ.).

20. Zhakshylyk K. R., Chylabayeva A.K., Arakel-yan A.A. The impact of economic cooperation between Kyrgyzstan and Russia on reducing unemployment and income growth of the population. *Regional economics and Management: an electronic scientific journal*. ISSN 1999-2645. 1999;2(74). URL: <https://eee-region.ru/article/7416/>. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/1999-2645-2023-274-16> (Accessed 19.02.2024).
21. Zhambyl Zh.Zh., Chylabayeva A.K., Zhakshylyk K.R. Regulation of unemployment and social protection of the population of Kyrgyzstan and Kazakhstan in the conditions of the EAEU. *Regional economics and Management: an electronic scientific journal*. ISSN 1999-2645. 1999;4(72). URL: <https://eee-region.ru/article/7201/>. <https://doi.org/10.24412/1999-2645-2022-472-1> (Accessed 19.02.2024). (In Russ.).
22. Astanova S.U. The current state and problems of development of the labor market of the Kyrgyz Republic. *Proceedings of the Osh University of Technology*. 2023;4:149–155.
23. Khamzayeva A.M., Myrzaibraimova Iru. On the issue of trends in the social development of the Kyrgyz Republic in modern conditions. *Current issues of the modern economy*. 2018;9:297–302. EDN: JLOJBK. (Accessed 16.02.2024). (In Russ.).

Сведения об авторах

Саламат Ураимовна Астанова, к.э.н., доцент кафедры Бухгалтерского учета и аудита, Ошский технологический университет им. М.М. Адышева

E-mail: s-astanova@mail.ru
ORCID: 0000-0002-0311-8616
SPIN-код: 4301-8100

Айнұра Мураталиевна Хамзаева, к.э.н., доцент, заведующая кафедрой Бухгалтерского учета и аудита, Ошский технологический университет им. М.М. Адышева
E-mail: ainura.hamzaeva@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7575-6150
SPIN-код: 5734-4780

Information about the authors:

Salamat U. Astanova, Cand. Sci. (Economics), Associate Professor of the Department of Accounting and Auditing, Osh Technological University named after M.M. Adyshev
E-mail: s-astanova@mail.ru
ORCID: 0000-0002-0311-8616
SPIN-код: 4301-8100

Ainura M. Khamzaeva, Cand. Sci. (Economics), Associate Professor of the Department of Accounting and Auditing, Osh Technological University named after M.M. Adyshev
E-mail: ainura.hamzaeva@gmail.com
ORCID: 0000-0001-7575-6150
SPIN-код: 5734-4780

Поступила в редакцию 14.12.2023
После доработки 19.02.2024
Принята к публикации 21.02.2024

Received 14.12.2023
Revised 19.02.2024
Accepted 21.02.2024

Оригинальная статья

УДК 338.2

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-1(47)-171-177

**ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВА РЕМОНТНОГО ЦЕХА
НА АВТОТРАНСПОРТНОМ ПРЕДПРИЯТИИ**

© 2024 г. А. А. Тишевский

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

Аннотация. В современных условиях предприятия сталкиваются с огромным количеством трудностей и неопределенностей, для сохранения своих позиций и развития организации ключевым становится понятие конкурентоспособности. Основная задача по повышению конкурентоспособности фирмы заключается в периодическом обновлении и расширении ассортимента, повышении качества своей продукции и предоставляемых услуг, осуществление модернизации и нововведений. Приоритетное направление развития предприятия – инвестирование в собственное производство. В настоящей работе приведено экономическое обоснование инвестиционного проекта строительства цеха по ремонту топливной аппаратуры на автотранспортном предприятии ООО «Автоколонна 2015». Данная организация оказывает услуги по предоставлению карьерных самосвалов для транспортировки горной массы в технологическом процессе, главным образом является подрядной организацией, обслуживающей открытые горные работы на территории компании ООО «Ресурс». В планах – проведение ремонтов топливной аппаратуры самосвалов марок БелАЗ, CATerpillar и Terax. В приоритете – предоставление ремонтных услуг предприятиям собственного бизнеса, компаниям, входящим в объединение ООО «Автоколонна 2015», которое в настоящее время насчитывает 19 организаций. Эти предприятия связаны с открытыми горными работами и карьерной техникой. При этом выход на внешний рынок обеспечивает дополнительные перспективы развития и улучшение финансово-экономических показателей организации. Объем капитальных вложений в проект составляет порядка 5,6 млн руб. С учетом предоставления услуг цеха по ремонту топливной аппаратуры сторонним организациям чистая прибыль по проекту предполагается 1,69 млн руб., рентабельность проекта 30,2 %, дисконтированный срок окупаемости 4,5 года.

Ключевые слова: инвестиции, инвестиционный проект, ремонт топливной аппаратуры, ООО «Автоколонна 2015»

Для цитирования: Тишевский А.А. Экономическое обоснование строительства ремонтного цеха на автотранспортном предприятии. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;1(47):171–177. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-171-177](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-171-177)

Original article

**ECONOMIC JUSTIFICATION FOR CONSTRUCTION OF A MAINTENANCE
DEPARTMENT AT AN AUTOMOBILE OPERATING COMPANY**

© 2024 A. A. Tishevskii

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

Abstract. Today enterprises face a great number of difficulties and uncertainties. Competitiveness becomes a key concept for maintaining position on the market and development of the organization. To increase its competitiveness company needs to modernize, innovate as well as periodically update, expand the range and improve the quality of its products and services. Priority growth area of the company's development is investing

in its own production. In this paper, the authors give the economic justification of the investment project for the construction of a workshop for the repair of fuel equipment at the motor transport company LLC Avtokolonna 2015. This organization provides services for the provision of quarry dump trucks used for transporting rock mass in the technological process, mainly it is a contractor for open-pit mining operations on the territory of LLC Resurs. The plans include repairs of fuel equipment for BelAZ, CATerpillar and Terax dump trucks. The priority is to provide repair services to enterprises of their own business, companies belonging to the association Avtokolonna 2015 LLC, which currently has 19 organizations. These enterprises are associated with open-pit mining and quarrying equipment. At the same time, entering the foreign market provides additional prospects for development and improvement of the financial and economic indicators of the organization. The volume of capital investments in the project is about 5.6 million rubles. Taking into account the provision of fuel equipment repair shop services to third-party organizations, the net profit for the project is expected to be 1.69 million rubles, the profitability of the project is 30.2 %, and the discounted payback period is 4.5 years.

Key words: investments, investment project, repair of fuel equipment, LLC Avtokolonna 2015

For citation: Tishevskii A.A. Economic justification for construction of a maintenance department at an automobile operating company. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;1(47):171–177. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1\(47\)-171-177](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-1(47)-171-177)

Введение

Безусловно, одним из важных направлений исследований в настоящее время является глубокое теоретическое изучение рыночных форм и механизмов инвестирования на разных уровнях [1]. Немаловажными являются проблематика теоретического обоснования критериев эффективности затрат на инвестиции, вопросы взаимной связи и обусловленности капитальных вложений и структурных сдвигов в сфере экономики, определение приоритетных направлений в структуре отраслевых инвестиций и внутри основных народнохозяйственных сфер [2].

Сложившаяся в России экономическая ситуация значительно усложняет инвестиционную деятельность: требуется разработка адекватного рыночным отношениям инвестиционного механизма, органически сочетающего формы частного и государственного инвестирования, оптимизации взаимосвязей различных субъектов инвестиционной деятельности, разработки соответствующей законодательно-нормативной базы и другие меры, регламентирующие инвестиционный процесс как на уровне отдельной фирмы, компании или отрасли, так и на уровне национальной экономики в целом [3].

В широком смысле инвестиционная деятельность предприятия является главным двигателем развития и экономического роста как отдельно взятой организации, так и в целом экономики всей страны [4]. Как известно, в настоящее время экономический кризис в нашей стране еще не преодолен, а масштабы и структура инвестиций не отвечают всем потребностям экономики [5]. Необходимо понимать, что важно не только количество инвестиций, но и целесообразность их использования. Для организаций важна грамотно спланированная инвестиционная стратегия, при которой ин-

вестиции будут использоваться наиболее рационально [6]. Инвестиционная стратегия подразумевает под собой формирование определенной системы долгосрочных инвестиционных целей и выбор как можно более эффективных способов для их достижения [7].

Инвестиционная политика является одним из важнейших аспектов функционирования предприятия с точки зрения экономической безопасности [8]. С помощью инвестиционной стратегии и ее применения на практике обновляется материально-техническая база, увеличиваются объемы производства, происходит освоение новых видов деятельности, а значит, естественным образом обеспечивается весьма высокий уровень экономической безопасности компании [9]. Необходимость проведения на предприятии реальной и комплексной инвестиционной политики очевидна. В то же время точечные и поверхностные преобразования не помогут повысить уровень экономической безопасности предприятия [10]. Таким образом, экономическая безопасность и инвестиции, безусловно, взаимосвязаны и взаимозависимы друг от друга.

Несмотря на все трудности, возникающие в современных геополитических условиях, благодаря грамотному руководству ООО «Автokolonna 2015» и работе в единой связке с компаниями, входящими в объединение, предприятию удалось пережить тяжелый кризис угольной промышленности, связанный с введенными в отношении нашей страны санкциями, и выйти из него на лидирующих позициях. В настоящее время организация удерживает высокие темпы развития, выходит на новые рубежи и показывает существенный прирост ключевых показателей экономического развития [11].

Однако руководству не стоит расслабляться, так как конкурирующие предприятия также стремятся к развитию. В настоящее время имеется еще множество недочетов в плане внутренней политики развития предприятия, которые необходимо устранить, требуется сокращение производственных расходов (возможно путем реализации различных инвестиционных проектов, способных уменьшить влияние внешних факторов на производство). В частности, необходим уход от зависимости от сторонних организаций как в плане услуг по ремонту подвижного состава, так и в снабжении предприятия запасными частями, цены на которые в условиях санкций существенно возросли [12].

Общество с ограниченной ответственностью «Автоколонна 2015» – это автотранспортное предприятие, предоставляющее услуги по транспортировке горной массы в технологическом процессе добычи угля грузовыми автомобилями сверхбольшой грузоподъемности, а также хранение, ремонт и техническое обслуживание подвижного состава. Предприятие основано в 2015 году в городе Новокузнецк Кемеровской области – Кузбассе. Создано предприятие на базе одного из структурных подразделений Общества с ограниченной ответственностью «Торговый Дом Сибирь». В настоящее время организация входит в состав группы компаний во главе с компанией ООО «Ресурс» и выполняет работы в интересах данного объединения в роли подрядной организации [13].

Предприятие ООО «Автоколонна 2015» занимает устойчивое положение на рынке, в собственности около 200 единиц техники, более 950 сотрудников. Постоянно реализуются инвестиционные проекты по закупке нового подвижного состава, количество подвижного состава в парке предприятия неуклонно растет. В своей деятельности предприятие руководствуется Уставом предприятия и федеральными законами, которые регламентируют деятельность. Также предприятие руководствуется инструктивными материалами, инструкциями, разработанными как самим предприятием, так и предоставленными с более высоких уровней управления [14].

Очень важным является определение конкретной области и целесообразности инвестирования предприятия, для чего необходимо сначала провести расчет предполагаемых результатов инвестиционной деятельности и определить, какое влияние данные инвестиции способны оказать на показатели развития предприятия [15].

В ходе настоящей работы было выявлено одно из возможных направлений инвестиционной деятельности, а именно, инвестиции с целью сокращения затрат на ремонт и обслуживание подвижного состава [16].

Методологическую и общетеоретическую базу составляют изучение и обобщение теории, метод анализа и синтеза при оценке влияния факторов внешней и внутренней среды, экономический анализ инвестиционной деятельности предприятия.

Основные результаты

В процессе эксплуатации подвижного состава происходит неизбежный износ деталей автомобилей и иной карьерной техники, данные процессы неминуемо ведут к необходимости ремонта или замены отдельных узлов и агрегатов. С учетом постоянного роста количества автомобилей, объем выполняемых операций по их ремонту, замене и обслуживанию неуклонно растет. В связи с этим становится очевидной необходимость в модернизации технических условий в области ремонта и обслуживания техники [17].

В настоящее время предприятие пользуется услугами сторонних организаций для выполнения отдельных видов ремонтных работ, стоимость подобных услуг возрастает с ростом количества оборудования, требующего ремонта или обслуживания.

Ремонт топливной аппаратуры является весьма затратным. В табл. 1, 2 приведены стоимости запасных частей, материалов и услуг по ремонту агрегатов топливной системы. Помимо самосвалов марки БелАЗ на предприятии эксплуатируются самосвалы и других марок (таких как CATerpillar и Terax). Их ремонты и обслуживание являются еще более затратными.

Предложение по направлению финансовых средств на инвестиции в области сокращения затрат на ремонт и обслуживание подвижного состава заключается во вложении средств в инвестиционный проект по строительству цеха по ремонту топливной аппаратуры автомобилей различных марок. В перспективе данный инвестиционный проект позволит сократить затраты на проведение работ по ремонту и обслуживанию топливной аппаратуры различных видов техники. Помимо удовлетворения собственных потребностей подобный проект позволит оказывать услуги сторонним организациям, в первую очередь организациям, входящим в объединение (более 15-ти организаций, включая ООО «Автоколонна 2015»), в которых эксплуатируется большое количество различной техники иностранного производства.

В состав капитальных вложений включаются затраты на приобретение, доставку и монтаж нового оборудования, строительные работы. В стоимость строительных работ входит строительство производственного помещения из быстровозводимых металлоконструкций и сэндвич-панелей. Стоимость данного вида работ составляет 24 тыс. руб./м². Площадь планируемого производственного помещения 45 м², общая стоимость строительных работ 1080 тыс. руб.

Калькуляция ремонта топливного насоса
Table 1. Calculation of fuel pump repair

Наименование запчастей	Кол-во	Ед. измерения	Стоимость
Ремкомплект	1	шт.	32904,83
Плунжерная пара	1	шт.	27304,58
Шайба медная	4	шт.	1288,20
Гайка	1	шт.	1750,38
Плунжер	1	шт.	13274,67
Сальник	1	шт.	5983,10
Муфта	1	шт.	2060,71
Гайка	2	шт.	2924,10
НШ	1	шт.	126144,96
Шестерня	1	шт.	11016,04
Груз нижний	1	шт.	30871,04
Кольцо	1	шт.	233,70
Растворитель 646	0,2	л	46,18
Дизельное топливо	1	л	55,00
Калибровочная жидкость	1	л	516,95
Loctite 638 (10 мл)	1	шт.	449,96
Полотно вафельное	1	м	52,66
Бумага наждачная № 12	1	лист	88,40
Работа	6,00	чел.·ч	7200
Итого			264165,45

Для оснащения цеха по ремонту топливной аппаратуры необходимо приобрести специализированное оборудование, список необходимого оборудования, количество и стоимость указаны в табл. 3.

Смета затрат на производство (табл. 4) определяет общую сумму расходов производственного подразделения на плановый период и необходима для расчета себестоимости работ этого подразделения.

В первую очередь экономический эффект представленного проекта заключается в экономии затрат на ремонт и обслуживание топливной аппаратуры, после реализации проекта так-

же становится возможным самостоятельное оказание услуг иным организациям, что позволит предприятию получать дополнительную прибыль [18].

Технико-экономические показатели являются обоснованием технических, технологических, планировочных и конструктивных решений и составляют основу каждого проекта [19]. Технико-экономические показатели служат основанием для решения вопроса о целесообразности строительства объекта при запроектированных параметрах и утверждения проектной документации для строительства [20].

Калькуляция ремонта топливной форсунки
Table 2. Calculation of fuel injector repair

Наименование запчастей	Кол-во	Ед. измерения	Стоимость
Корпус и плунжер в сборе	2	шт.	89384,18
Распылитель	2	шт.	28979,83
Держатель пружины	2	шт.	5449,48
Кольцо уплотнительное форсунки	6	шт.	2518,64
Герметик (80 мл)	10	мл.	276,90
Фиксатор резьб. соед. (250 мл)	10	мл.	756,24
Дизельное топливо	0,50	л.	36,38
Полотно вафельное отбеленное	0,10	м.	7,92
Калибровочная жидкость	0,20	л.	188,57
Полотенце синее	0,10	м.	2,34
Жидкость для ультразвуковой мойки	0,50	шт.	241,24
Работа	2	чел.·ч	2822,69
Итого			130664,47

Стоимость приобретаемого оборудования
Table 3. Cost of purchased equipment

№	Наименование	Кол-во, шт.	Стоимость, руб.
1	Ларь для использованной ветоши	1	7000
2	Ларь для чистой ветоши	1	7000
3	Раковина (умывальник)	1	2000
4	Шкаф сушильный для деталей	1	27000
5	Ванна для чистки и мойки деталей и сборочных единиц	1	11000
6	Стеллаж секционный полочный для деталей	2	16000
7	Установка для тестирования и очистки форсунок Launch CNC 602	1	39000
8	Ларь для отходов	1	2500
9	Верстак слесарный с тисками	1	26000
10	Тумбочка инструментальная	2	32000
11	Прибор для диагностики и тестирования форсунок CR TESTER. PR.	1	69000
12	Пожарный щит и ящик с песком	1	6500
13	Стол монтажный металлический	1	10000
14	Стенд для проверки плунжерных пар	1	63000
15	Стенд для разборки и сборки ТНВД	1	43500
16	Прибор для замера активного хода плунжера	1	17000
17	Прибор для проверки гидравлической плотности нагнетательных клапанов	1	21000
18	Шкаф для приборов и инструментов	1	15000
19	Набор инструментов	1	37000
20	Стенд DORPAT Multi-Sam для регулировки дизельных форсунок.	1	3550000
	Итого	22	4001500

По предлагаемым изменениям технико-экономические показатели приведены в табл. 5.

С учетом предоставления услуг цеха по ремонту топливной аппаратуры сторонним организациям чистая прибыль по проекту составит 1 690 620 рублей, рентабельность данного проекта 30,2 %, срок окупаемости с учетом дисконтирования 4,5 лет.

Выводы

Рост и развитие предприятия являются основной задачей любого руководства, для достижения которой необходимо преодолеть немало трудностей. В настоящее нестабильное время, из-за роста цен на различного рода услуги и товары, все актуальнее становится вопрос сокращения затрат на

Смета расходов на производство
Table 4. Production cost estimates

Статья расходов	Стоимость, руб.
Силовая электроэнергия	29000
Отопление	2025
Осветительная электроэнергия	17464
Затраты на водоснабжение	143
Текущий ремонт оборудования	200075
Охрана труда, техника безопасности и спецодежда	21000
Заработная плата	2194920
Начисления на заработную плату	658476
Затраты на расходные материалы	2764800
Амортизационные отчисления	575170
Всего накладных расходов	6463073

Технико-экономические показатели
Table 5. Technical and economic indicators

Показатель	По факту	По проекту
Трудоемкость работ подразделения, чел. час.	5628	5628
Число производственных рабочих, чел.	3	3
Среднемесячная заработная плата производственных рабочих по ремонту и ТО топливной системы, руб./месяц	60970	60970
Накладные расходы, руб.	–	6463073
Предполагаемый доход, руб.	–	3658200
Прибыль чистая, руб.	–	1690620
Капитальные вложения, руб.	–	5081500
Срок окупаемости капитальных вложений, лет	–	3,3
Срок окупаемости с учетом дисконтирования, лет	–	4,5

производство посредством отказа от услуг сторонних организаций. Предложение по направлению финансовых средств на инвестиции в области сокращения затрат на ремонт и обслуживание подвижного состава способно позволить предприятию добиться высоких экономических результатов и может быть реализовано в рамках инвестиционной деятельности организации ООО «Автоколонна 2015».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Инвестиции и инвестиционная деятельность организаций* / Т.К. Руткаускас, А.Ю. Домников, Л.А. Медведева, Ф.Р. Бабанова, К.В. Руткаускас, М.О. Федоренко, М.В. Попов. Екатеринбург: изд. Урал. ун-та, 2019:316.
2. Акчурина А.М., Ибрагимова Г.М., Раянова Г.Н. Система управления инвестиционной деятельностью на предприятии. *Экономика и управление: научно-практический журнал*. 2018;5(143):102–107.
3. Арустамов Э.А. Основы бизнеса: учебник. Москва: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2019;230.
4. Быков А.Ю. Инвестиционный климат экономической стабильности. *Юрист*. 2020;1:59–66.
5. Кирилловых А.А. Краудфандинг как альтернативный способ привлечения инвестиций в предпринимательскую деятельность. *Право и экономика*. 2020;9:33–42.
6. Нифонтов А.И., Черникова О.П., Кушнеров Ю.П. Методы оценки экономической эффективности логистической системы и управления уровнем логистических затрат. *Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Политические, социологические и экономические науки*. 2019;4(2):239–245. <https://doi.org/10.21306/2500-3372-2019-4-2-239-245>
7. Минасян А.А., Репьева С.С., Первухина Е.В., Чукавин И.Ю., Юхимец В.И. Финансовое обеспечение инвестиционной деятельности предприятия. *Вестник Алтайской академии экономики и права*. 2021;9-1:81–85.
8. Борисова О.В., Малых Н.И., Овешникова Л.В. Инвестиционный анализ: учебник практику для бакалавриата и магистратуры. Москва: Юрайт, 2019;218.
9. Islam M.S., Elahi T.E., Shahriar A.R., Mumtaz N. Effectiveness of fly ash and cement for compressed stabilized earth block construction. *Construction and Building Materials*. 2020;255:119392. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat>
10. Chernikova O.P., Baranov P.P. Environmental reporting in coal mining. *Gornyi Journal*. 2018;3:82–85. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.03.14>
11. Zhang Y., Xu Z., Tu Y., Wang J., Li J. Study on properties of coal-sludge-slurry prepared by sludge from coal chemical industry *Powder Technology*. 2020;366:552–559. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2020.03.005>
12. Gupta S., Chaudhary S. Use of fly ash for the development of sustainable construction materials. *New Materials in Civil Engineering*. 2020;21:677–689. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-818961-0.00021-1>
13. ООО «Автоколонна 2015». – URL: <https://www.list-org.com/company/8232426> (дата обращения 19.11.2023).
14. Котлер Ф. Основы маркетинга. Краткий курс / Пер. с англ. – Москва; Санкт-Петербург; Киев: Изд. дом «Вильямс», 2019;646.
15. Wang R., Liu J., Lv Y., Ye X. Sewage sludge disruption through sonication to improve the co-preparation of coal-sludge slurry fuel: The effects of sonic frequency. *Applied Thermal Engineering*. 2019;99:645–651. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.01.098>
16. Albright S.C., Winston W.L. *Business Analytics: Data Analysis and Decision Making*. Ingram, 2023;346.
17. Ingram T.N., Laforge R.W., Avila R.A., Charles H., Schwepker Jr., Williams M.R. *Professional Selling: A Trust-Based Approach*. Ingram: 2021;464.
18. Stubbs E. *The value of business analytics: Identifying the path to profitability*. Lori, 2021;336.

19. Wang R., Liu J., Lv Y., Ye X. Sewage sludge disruption through sonication to improve the co-preparation of coal-sludge slurry fuel: The effects of sonic frequency. *Applied Thermal Engineering*. 2019;99:645–651. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2019.01.098>
20. Барбаш А.И. Особенности учета капитальных инвестиций на предприятии сферы транспорта и логистики. *Чернігівський науковий часопис*. 2019;1:94–98. EDN: VKCJST.

REFERENCES

1. Rutkauskas T.K., Domnikov A.Yu., Medvedeva L.A., Babanova F.R., Rutkauskas K.V., Fedorenko M.O., Popov M.V. *Investments and investment activities of organizations*. Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2019:316. (In Russ.).
2. Akchurina A.M., Ibragimova G.M., Rayanova G.N. Investment activity management system at the enterprise. *Economics and Management: a scientific and practical journal*. 2018;5(143):102-107. (In Russ.).
3. Arustamov E.A. *Fundamentals of business: textbook*. Moscow: Publishing and Trading Corporation Dashkov and K, 2019;230. (In Russ.).
4. Bykov A.Yu. *Investment climate of economic stability*. Lawyer. 2020;1:59-66. (In Russ.).
5. Kirillovykh A.A. Crowdfunding as an alternative way to attract investment in entrepreneurial activity. *Law and economics*. 2020;9:33–42. (In Russ.).
6. Nifontov A.I., Chernikova O.P., Kushnerov Yu.P. Methods for assessing the economic efficiency of a logistics system and managing the level of logistics costs. *Bulletin of Kemerovo State University. Series: Political, Sociological and Economic Sciences*. 2019;4(2):239–245. (In Russ.). <https://doi.org/10.21306/2500-3372-2019-4-2-239-245>
7. Minasyan A.A., Repyeva S.S., Pervukhina E.V., Chukavin I.Yu., Yukhimets V.I. Financial support of the investment activity of the enterprise. *Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*. 2021;9-1:81-85. (In Russ.).
8. Borisova O.V., Malykh N.I., Vishnyakova L.V. *Investment analysis: textbook practice for bachelor's and master's degrees*. Moscow: Yurait, 2019;218. (In Russ.).
9. Islam M.S., Elahi T.E., Shahriar A.R., Mumtaz N. Effectiveness of fly ash and cement for compressed stabilized earth block construction. *Construction and Building Materials*. 2020;255:119392. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat>
10. Chernikova O.P., Baranov P.P. Environmental reporting in coal mining. *Gornyi Journal*. 2018;3:82–85. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.03.14>
11. Zhang Y., Xu Z., Tu Y., Wang J., Li J. Study on properties of coal-sludge-slurry prepared by sludge from coal chemical industry *Powder Technology*. 2020;366:552–559. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2020.03.005>
12. Gupta S., Chaudhary S. Use of fly ash for the development of sustainable construction materials. *New Materials in Civil Engineering*. 2020;21:677–689. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-818961-0.00021-1>
13. LLC Avtokolonna 2015. Available at URL: <https://www.list-org.com/company/8232426> (Accessed 19.11.2023). (In Russ.).
14. Kotler F. *The basics of marketing. A short course / Translated from English – Moscow; St. Petersburg; Kiev: Publishing house "Williams", 2019:646. (In Russ.).*
15. Wang R., Liu J., Lv Y., Ye X. Sewage sludge disruption through sonication to improve the co-preparation of coal-sludge slurry fuel: The effects of sonic frequency. *Applied Thermal Engineering*. 2019;99:645–651. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.01.098>
16. Albright S.C., Winston W.L. *Business Analytics: Data Analysis and Decision Making*. Ingram, 2023;346.
17. Ingram T.N., Laforge R.W., Avila R.A., Charles H., Schwepker Jr., Williams M.R. *Professional Selling: A Trust-Based Approach*. Ingram: 2021;464.
18. Stubbs E. *The value of business analytics: Identifying the path to profitability*. Lori, 2021;336.
19. Wang R., Liu J., Lv Y., Ye X. Sewage sludge disruption through sonication to improve the co-preparation of coal-sludge slurry fuel: The effects of sonic frequency. *Applied Thermal Engineering*. 2019;99:645–651. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2019.01.098>
20. Barabash A.I. Features of accounting for capital investments in enterprises in the field of transport and logistics. *Chernihiv scientific journal*. 2019;1:94–98. EDN: VKCJST. (In Russ.).

Сведения об авторах

Андрей Андреевич Тишевский, магистрант, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: tishevskiy.1992@mail.ru
ORCID: 0009-0000-2322-3125
SPIN-код: 4482-9473

Information about the authors:

Andrei A. Tishevskii, Master's Degree Student, Siberian State Industrial University
E-mail: tishevskiy.1992@mail.ru
ORCID: 0009-0000-2322-3125
SPIN-код: 4482-9473

Поступила в редакцию 21.12.2023
 После доработки 26.02.2024
 Принята к публикации 28.02.2024

Received 21.12.2023
 Revised 26.02.2024
 Accepted 28.02.2024

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

С 22 июня 2023 г. журнал «Вестник Сибирского государственного индустриального университета» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по специальностям:

- 1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические; технические);
- 2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические);
- 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов (технические);
- 2.6.17. Материаловедение (технические).

В журнале публикуются оригинальные, ранее не публиковавшиеся статьи, содержащие наиболее существенные результаты научно-технических экспериментальных исследований, а также итоги работ проблемного характера по следующим направлениям:

- физика конденсированного состояния;
- информационные технологии;
- металлургия и материаловедение;
- региональная и отраслевая экономика.

К рукописи следует приложить рекомендацию соответствующей кафедры высшего учебного заведения, экспертное заключение, разрешение ректора или проректора высшего учебного заведения (для неучебного предприятия – руководителя или его заместителя) на опубликование результатов работ, выполненных в данном вузе (предприятии), авторское согласие.

В редакцию следует направлять материалы статьи в электронном виде и два экземпляра текста статьи на бумажном носителе. Для ускорения процесса рецензирования статей электронный вариант статьи и скан-копии сопроводительных документов рекомендуется направлять по электронной почте по адресу *e-mail: vestnicsibgiu@sibsiu.ru*. При направлении материалов в редакцию необходимо указывать раздел, в котором статья будет опубликована.

Таблицы, библиографический список и подристочный текст следует представлять на отдельных страницах. В рукописи необходимо сделать ссылки на таблицы, рисунки и литературные источники, приведенные в статье.

Иллюстрации нужно представлять отдельно от текста на носителе информации. Пояснительные надписи в иллюстрациях должны быть выполнены шрифтом Times New Roman Italic (греческие буквы – шрифтом Symbol Regular) размером 9. Тоновые изображения, размер которых не должен превышать 75×75 мм (фотографии и другие изображения, содержащие оттенки черного цвета), следует направлять в виде растровых графических файлов (форматов *.bmp, *.jpg, *.gif, *.tif) в цветовой шкале «оттенки серого» с разрешением не менее 300 dpi (точек на дюйм). Штриховые рисунки (графики, блок-схемы и т.д.) следует представлять в «черно-

белой» шкале с разрешением не менее 600 dpi. На графиках не нужно наносить линии сетки, а экспериментальные или расчетные точки (маркеры) без крайней необходимости не «заливать» черным. Штриховые рисунки, созданные при помощи распространенных программ MS Excel, MS Visio и др., следует представлять в формате исходного приложения (*.xls, *.vsd и др.).

Шрифтовое оформление физических величин: латинские буквы в светлом курсивном начертании, русские и греческие – в светлом прямом. Числа и единицы измерения – в светлом прямом начертании. Особое внимание следует обратить на правильное изображение индексов и показателей степеней. Формулы набираются с помощью редакторов формул Equatn или Math Type, масштаб формул должен быть 100 %. Масштаб устанавливается в диалоговом окне «Формат объекта». В редакторе формул для латинских и греческих букв использовать стиль «Математический» («Math»), для русских – стиль «Текст» («Text»). Размер задается стилем «Обычный» («Full»), для степеней и индексов – «Крупный индекс / Мелкий индекс» («Subscript / Sub-Subscript»). Недопустимо использовать стиль «Другой» («Other»).

Необходимо избегать повторения одних и тех же данных в таблицах, графиках и тексте статьи. Объем статьи не должен превышать 18 – 20 страниц текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала.

Рукопись должна быть тщательно выверена, подписана автором (при наличии нескольких авторов, число которых не должно превышать пяти, – всеми авторами); в конце рукописи указывают полное название высшего учебного заведения (предприятия) и кафедры, дату отправки рукописи, а также полные сведения о каждом авторе (Ф.И.О., место работы, должность, ученая степень, звание, служебный и домашний адреса с почтовыми индексами, телефон, e-mail, ORCID). Необходимо указать, с кем вести переписку.

Цитируемую в статье литературу следует давать общим списком в порядке упоминания в статье с обозначением ссылки в тексте порядковой цифрой. Перечень литературных источников рекомендуется не менее 20.

Библиографический список оформляют в соответствии с ГОСТ 7.0.100 – 2018: а) для книг – фамилии и инициалы авторов, полное название книги, номер тома, место издания, издательство и год издания, общее количество страниц; б) для журнальных статей – фамилии и инициалы авторов, полное название журнала, название статьи, год издания, номер тома, номер выпуска, страницы, занятые статьей; в) для статей из сборников – фамилии и инициалы авторов, название сборника, название статьи, место издания, издательство, год издания, кому принадлежит, номер или выпуск, страницы, занятые статьей.

Иностранные фамилии и термины следует давать в тексте в русской транскрипции, в библио-

графическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводят в оригинальной транскрипции.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

К статье должны быть приложены аннотация объемом 200 – 250 слов, ключевые слова.

В конце статьи необходимо привести на английском языке: название статьи, Ф.И.О. авторов, место их работы, аннотацию и ключевые слова.

Краткие сообщения должны иметь самостоятельное научное значение и характеризоваться новизной и оригинальностью. Они предназначены для публикации в основном аспирантских работ. Объем кратких сообщений не должен превышать двух страниц текста, напечатанного шрифтом 14 через полтора интервала, включая таблицы и библиографический список. Под заголовком в скобках следует указать, что это краткое сообщение. Допускается включение в краткое сообщение одного несложного рисунка, в этом случае текст должен быть

уменьшен. Приводить в одном сообщении одновременно таблицу и рисунок не рекомендуется.

Количество авторов в кратком сообщении должно быть не более трех. Требования к оформлению рукописей и необходимой документации те же, что к оформлению статей.

Корректуры статей авторам, как правило, не посылают.

В случае возвращения статьи автору для исправления (или при сокращении) датой представления считается день получения окончательного текста.

Статьи, поступающие в редакцию, проходят гласную рецензию.

Статьи журнала индексируются в РИНЦ, представлены на сайтах <https://vestnik.sibsiu.ru/> и <https://www.sibsiu.ru> в разделе Наука и инновации (Периодические научные издания (Журнал «Вестник СибГИУ»)).

TO THE AUTHORS ATTENTION

On June 22, 2023 the journal, "Bulletin of Siberian State Industrial University" was included in the List of peer-reviewed scientific editions. The journal should publish the main scientific results of dissertations for the degrees of Candidates and Doctors of Sciences in following specialties:

- 1.3.8. Condensed matter physics (physical and mathematical; engineering);
- 2.6.1. Metallurgy and heat treatment of metals and alloys (engineering);
- 2.6.2. Metallurgy of ferrous, non-ferrous and rare metals (engineering);
- 2.6.17. Materials science (engineering).

The journal "Bulletin of the Siberian State Industrial University" received K2 category.

The journal publishes original, previously unpublished articles containing the most significant results of scientific and technical experimental research, as well as the results of problematic work in the following areas:

- Condensed matter physics;
- IT;
- Metallurgy and materials science;
- Regional and sectorial economics.

The paper should be accompanied by the recommendation of the relevant department of the higher education institution, expert opinion, permission of the rector or vice-rector of the higher education institution (for a non-academic enterprise - the head or his deputy) to publish the results of the work performed in this university (enterprise), author's consent.

The editorial office should receive the materials of the article in electronic form and two copies of the text of the article in hard copy. To speed up the review process, it is recommended to send the electronic version of the article and scanned copies of accompanying documents by e-mail to vestnicsibgiu@sibsui.ru. You should indicate the section in which the article will be published before sending materials to the editorial office.

Tables, reference list, and captions should be presented on separate pages. You need to make references to tables, figures and references cited in the article.

Illustrations should be presented separately from the text. Explanatory inscriptions in illustrations should be made in Times New Roman Italic font size 9 (Greek letters - in Symbol Regular font). Gray-scale images, the size of which should not exceed 75×75 mm (photographs and other images containing shades of black), should be sent as raster graphic files (formats *.bmr, *.jpg, *.gif, *.tif) in the color scale "shades of gray" with a resolution of at least 300 dpi. Stroke drawings (graphs, flowcharts, etc.) should be presented in "black and white" scale with a resolution of at least 600 dpi. You do not need to draw grid lines on the graphs, and to "fill" black experimental or calculation points (markers) without absolute necessity. Stroke drawings created using common programs MS Excel, MS Visio,

etc., should be presented in the format of the original application (*.xls, *.vsd, etc.).

Typography of physical quantities: Latin letters in light italic, Russian and Greek letters in light straight type. Numbers and units of measurement are in light-colored straight type. Particular attention should be paid to the correct representation of indexes and degree indicators. Formulas are typed with the help of formula editors' Equatn or Math Ture, the scale of formulas should be 100%. The scale is set in the Format Object dialog box. In the formula editor, use the "Math" style for Latin and Greek letters, and the "Text" style for Russian letters. The size should be "Full", for degrees and indexes – "Subscript / Sub-Subscript". Do not use the "Other" style.

It is necessary to avoid repetition of the same data in tables, graphs and the text of the article. The volume of the article should not exceed 18 – 20 pages of text, printed in font 14 at one and a half intervals.

The manuscript should be carefully checked, signed by the author (if there are several authors, the number of which should not exceed five – by all authors). At the end of the manuscript indicate the full name of the higher education institution (enterprise) and department, the date of submission of the manuscript, as well as complete information about each author (full name, place of work, position, academic degree, title, office and home addresses with postal codes, telephone, e-mail, ORCID). It is necessary to indicate with whom to correspond.

References cited in the article should be given in a general list in the order of mentioning in the article, with the reference in the text indicated by a serial number. The list of literature sources is recommended no less than 20.

The references shall be arranged in accordance with GOST 7.0. 100 – 2018: a) for books – surnames and initials of authors, full title of the book, volume number, place of publication, publisher and year of publication, total number of pages; b) for journal articles - surnames and initials of authors, full title of the journal, title of the article, year of publication, volume number, issue number, pages covered by the article; c) for articles from collections – surnames and initials of authors, title of the collection, title of the article, place of publication, publisher, year of publication, to whom it belongs, number or issue, pages covered by the article.

Foreign names and terms should be given in the text in Russian transcription. In the references, the names of authors, full names of books and journals should be given in their original transcription.

References to unpublished works are not allowed.

The article should be accompanied by an abstract of 200 – 250 words and key words.

The title of the article, full name of the authors, place of their work, abstract and key words should be given in English at the end of the article.

Short reports should have independent scientific value and be characterized by novelty and originality. These are mainly meant for the publication of post-

graduate papers. Short reports should not exceed two pages of text, typed in 14-point font at one and a half intervals, including tables and bibliography. It should be indicated in brackets under the title that it is a short paper. You can include one simple figure in a brief message; in this case, the text should be reduced. We do not recommend including both a table and a figure in the same paper.

The number of authors in a short report should not exceed three. The requirements for the submission of manuscripts and required documentation are identical to those for the submission of articles. As a rule, corrections of articles are not forwarded to the authors.

If the article is returned to the author for correction (or in case of reduction), the date of submission is considered to be the day of receiving the final text.

Articles submitted to the editorial office are subject to public review.

The articles of the journal are indexed in the Russian Science and Technology Center (RSCI), presented on the websites <https://vestnik.sibsiu.ru/> and <https://www.sibsiu.ru> in the section Science and Innovations (Periodical Scientific Editions (Journal “Vestnik SibGIU”).

Н а д н о м е р о м р а б о т а л и

Коновалов С.В., главный редактор

Запольская Е.М., ответственный секретарь

Бащенко Л.П., ведущий редактор

Гашикова А.О., ведущий редактор

Темлянцева Е.Н., верстка

Олендаренко Е.В., менеджер по работе с клиентами

Безродная Е.А., администратор сайта